



Escola de Camins

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria de Camins, Canals i Ports
UPC BARCELONATECH

Optimizació de la instrumentació geotècnica en la construcció de túnels

Treball realitzat per:

Marc De Luis Ruiz

Dirigit per:

Alberto Ledesma Villalba

Grau en:

Enginyeria Geològica

Barcelona, 22/06/2016

Departament d'Enginyeria del Terreny, Cartogràfica i
Geodèsica

TREBALL FINAL DE GRAU

Agradecimientos

Me gustaría agradecer al profesor Alberto Ledesma por contar conmigo y dejarme llevar a cabo este trabajo, así como todos los momentos de reunión que hemos tenido a pesar de las dificultades para poder hacerlo.

M'agradaria agrair i donar-li les gràcies també a en Cristian De Santos, per ser tant comprensiu i ajudar-me amb tots els dubtes que he tingut amb el programa Plaxis durant el desenvolupament del treball i altres dubtes d'interés relacionats, sense la seva ajuda no hagués sigut possible realitzar satisfactòriament aquest treball final de grau.

Amics, familiars i gent que m'envolta en el dia a dia i que ha permès que aquest treball hagi sigut més fàcil.

A tú, per estar sempre que t'he necessitat, per tots els moments de suport i tots els moments junts durant la realització d'aquest treball, Margot.

Resumen

En los últimos años, la construcción de túneles se ha visto bastante afectada por incidencias de carácter material como por ejemplo en el caso del Carmel (Barcelona), haciendo así que las medidas preventivas contra daños alrededor del área de construcción sean más estrictas. Gracias al avance de programas informáticos de cálculo y avances técnicos en instrumentación geotécnica, la prevención y control de estas obras es cada vez mejor. Los análisis numéricos, que nos permiten prever el comportamiento del terreno y en consecuencia de la obra en etapas futuras, son cada vez más precisos, aportando menor incertidumbre en el frente de excavación y áreas próximas a éste en superficie. Para ello, es necesario aportar información consistente a los modelos, algo que puede hacerse a través de análisis retrospectivos: a partir de medidas de campo durante la construcción del túnel se puede identificar los parámetros del modelo que mejor ajustan el cálculo a las medidas. Aparece entonces una cuestión clave: saber en qué parte del terreno a excavar es mejor desplegar la instrumentación geotécnica para obtener esos valores.

El objetivo de éste trabajo es proporcionar una optimización de la instrumentación geotécnica a partir de mapas de sensibilidades de los diferentes movimientos del terreno respecto a los parámetros que son de interés en túneles como por ejemplo el coeficiente de empuje en el reposo (K_0), el ángulo de fricción interna del terreno (ϕ), la Cohesión (c), Módulos elásticos (E_{50} , E_{ur} , E), etc. Obteniendo así la región más óptima para medir dichos parámetros, dentro de la geometría creada previamente. También se ha estudiado la sensibilidad de las medidas de presión de agua respecto a dichos parámetros. El programa de elementos finitos PLAXIS se ha usado para este estudio, con el modelo constitutivo “Hardening Soil Model”. Finalmente los mapas de sensibilidad de las medidas respecto a los diferentes parámetros se han generado con el software SURFER. De este modo obtenemos un mapa que nos muestra la zona óptima de medición para identificar mejor un determinado parámetro del modelo.

A partir de los mapas de sensibilidad podemos planificar una mejor instrumentación en la obra, midiendo cada variable en la zona donde proporciona más información sobre los parámetros de nuestro modelo.

Abstract

During the last years, tunnel constructions have been affected by serious material incidents like ground or building failures (for example Carmel Tunnel, Barcelona) provoking a more strict control on the preventive measures to avoid any damage close to the excavation zone. Thanks to the development of computer programs and advances in geotechnical instrumentation, prevention and control of this type of works is continuously improving. Numerical analyses that allow us to predict soil behaviour and the evolution of works are nowadays quite precise, reducing uncertainties in the excavation front and in the area of influence. To do that, it is necessary to provide models with consistent information, a task that can be carried out by means of backanalysis: from field measurements during tunnel construction it is possible to identify model parameters that better match computations and measurements. A key aspect arises: where should we deploy geotechnical instrumentation to obtain much information and the best values of the parameters.

The goal of this work is to provide a geotechnical monitoring optimization from sensitive maps of the different movements with respect to the parameters that are of interest in tunnels, as the earth pressure coefficient at rest (K_0), angle of internal friction (ϕ), Cohesion (c), Elastic Modulus (E_{50} , E_{ur} , E), etc. obtaining the best area in the ground to measure those parameters, in the geometry that we have previously created. Sensitivity of water pressure measurements with respect those parameters has been studied as well. Finite Element code PLAXIS has been used in this work, including the “Hardening Soil Model” as constitutive law. Finally, sensitivity maps of measurements with respect to the parameters have been generated by using SURFER software. In this manner a map including the optimum zone for measuring is obtained, so a particular parameter could be better identified.

From the sensitivity maps it is possible to plan a better instrumentation in a construction, measuring each variable in the zone where more information about the parameters of the model is provided.

Índice

Agradecimientos	1
Resumen	2
Abstract	3
Índice de Figuras.....	7
Índice de Tablas.....	10
1. Introducción.....	11
2. Estado del Arte.....	14
2.1. Necesidad de instrumentar en la construcción de túneles	14
2.2. Identificación de parámetros.....	16
2.3. Sensibilidad del parámetro y optimización de la región óptima	17
3. Diseño Óptimo.....	19
3.1. Planteamiento	19
3.2. Minimización de la función objetivo.....	21
3.3. Relación con el Método de los Elementos Finitos	22
4. Programa de Cálculo: PLAXIS	23
4.1. Modelos constitutivos.....	24
4.2. Modelo Constitutivo Elástico	26
4.3. Modelo Constitutivo Mohr-Coloumb (Plasticidad Perfecta).....	29
.....	30
4.4. Modelo Constitutivo Hardening Soil (Isotropic Hardening).....	38
5. Descripción del caso Base.....	52
5.1. Procedimiento constructivo del túnel en PLAXIS	54
6. Análisis de Sensibilidad y Resultados Obtenidos.....	62
6.1. Procedimiento de cálculo de la Sensibilidad de un parámetro	62
6.2. Consistencia de la Sensibilidad de la derivada.....	64
6.3. Representación de la Sensibilidad de un parámetro con el software SURFER.....	67
6.4. Resultados obtenidos con el modelo Hardening Soil	70
6.5. Consistencia de los resultados con las matrices de sensibilidad.....	84
6.6. Efecto del estudio de la Sensibilidad sobre la pérdida de volumen en el túnel.....	88
6.7. Tendencias de los mapas de sensibilidad para otras geometrías.....	91
7. Conclusiones	93

7.1. Sensibilidad de los movimientos respecto a los parámetros	93
7.2. Sensibilidad de la presión de agua respecto a los parámetros	96
7.3. Líneas futuras de investigación	98
8. Referencias Bibliográficas.....	99
9. Anejos.....	101

Índice de Figuras

<i>Figura 1. Inclínómetro.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 2. Extensómetro fijo.....</i>	<i>15</i>
<i>Figura 3. Gráfico Tensión-Deformación de un material elastoplástico perfecto en 1D.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 4. Superficie de fluencia de Mohr-Coulomb en ejes de tensiones principales ($c=0$).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 5. Tabla de introducción de parámetros en PLAXIS.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 6. Definición de E_0 y E_{50} para resultados estándar de tests triaxiales drenados.....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 7. Círculos tensionales de la superficie de fluencia.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 8. Ventana de PLAXIS para la introducción de parámetros avanzados.....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 9. Relación hiperbólica tensión-deformación en carga primaria para un ensayo triaxial drenado estándar.....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 10. Movimiento sucesivo de la línea de rotura de Mohr-Coulomb dependiendo de varios valores constantes del valor de endurecimiento Y_P.....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 11. Parámetros básicos del modelo Hardening Soil.....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 12. Definición de E_{oedref} en resultados de test edométrico.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 13. Parámetros avanzados del modelo Hardening Soil.....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 14. Curva de deformación resultante para un test triaxial estándar drenado cuando se incluye el corte de dilatación.....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 15. Ventana de las propiedades avanzadas generales.....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 16. Superficie de fluencia en el plano $p-q$ (2D).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 17. Representación de toda la superficie de fluencia del modelo Hardening-Soil en tensiones principales para suelo con poca cohesión.....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 18. Geometría diseñada para los cálculos de sensibilidades.....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 19. Malla de elementos finitos creada para la simulación de la construcción del túnel.....</i>	<i>53</i>
<i>Figura 20. Aspecto de la geometría en la fase 0 del proceso de cálculo.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 21. Aplicación del M_{stage} en PLAXIS.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 22. Comparación de la pérdida de volumen con el M_{stage} escogido.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 23. Menú de introducción del valor de $\sum M_{stage}$.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 24. Aspecto de la geometría de PLAXIS en la Fase 1 (excavación del túnel sin colocar revestimiento).....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 25. Asiento del terreno debido a la excavación (escala vertical aumentada 100 veces).....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 26. Revestimiento introducido en el túnel después de la excavación (escala vertical aumentada 100 veces).....</i>	<i>59</i>

<i>Figura 27. Panel de PLAXIS con el intervalo de tiempo marcado a 365 días en la fase 3 de la construcción del túnel.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 28. Visualización del asiento en superficie con la escala vertical aumentada 100 veces</i>	<i>61</i>
<i>Figura 29. Visualización del asiento en superficie a escala real.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 30. gráfico que muestra la diferencia del asiento en superficie entre el valor inicial de la Cohesión (valor=10KPa) y la misma aumentando su valor inicial en un 1.3% (10,13 KPa).</i>	<i>64</i>
<i>Figura 31. Sensibilidad (estabilidad) de la derivada del movimiento horizontal respecto del parámetro cohesión cerca de rotura.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 32. Sensibilidad (estabilidad) de la derivada del movimiento vertical respecto del parámetro cohesión cerca de rotura.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 33. ampliación de la figura 30 con el rango óptimo señalado.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 34. ampliación figura 31 con el rango óptimo señalado</i>	<i>66</i>
<i>Figura 35. Visualización del programa SURFER antes de crear el mapa de isolíneas.....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 36. Datos de la geometría y valor de derivadas introducidos en SURFER.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 37. Mapa de isolíneas de la sensibilidad del movimiento horizontal respecto al parámetro Cohesión con un aumento del 1.3% respecto al valor inicial.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 38. Mismo mapa de la Figura 36 con escala de color para la sensibilidad existente.</i>	<i>69</i>
<i>Figura 39. Sensibilidad de X respecto a K_0 (1.3%)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 40. Sensibilidad de X respecto a K_0 (1.4%)</i>	<i>70</i>
<i>Figura 41. Sensibilidad de X respecto a K_0 (1.5%)</i>	<i>71</i>
<i>Figura 42. Sensibilidad de X respecto a K_0 (15%)</i>	<i>71</i>
<i>Figura 43. Sensibilidad de Y respecto al parámetro K_0 (1.3%).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 44. Sensibilidad de la Presión de agua respecto al parámetro K_0 con un aumento del 1.3%</i>	<i>73</i>
<i>Figura 45. Sensibilidad de X respecto al parámetro Φ (1.3%).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 46. Sensibilidad de Y respecto al parámetro Φ (1.3%).....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 47. Sensibilidad de la presión de Agua respecto al parámetro Φ (1.3%)</i>	<i>75</i>
<i>Figura 48. Ampliación de la figura 46</i>	<i>75</i>
<i>Figura 49. Sensibilidad de X respecto al parámetro Cohesión (1.3%).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 50. Sensibilidad de Y respecto al parámetro Cohesión (1.3%).....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 51. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Cohesión (1.3%)</i>	<i>77</i>
<i>Figura 52. Ampliación de la figura 50</i>	<i>78</i>
<i>Figura 53. Sensibilidad de X respecto al parámetro E_{50} (1.3%)</i>	<i>78</i>
<i>Figura 54. Sensibilidad de Y respecto al parámetro E_{50} (1.3%)</i>	<i>79</i>

<i>Figura 55. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro E50 (1.3%)</i>	<i>79</i>
<i>Figura 56. Ampliación de la figura 54</i>	<i>80</i>
<i>Figura 57. Sensibilidad de X respecto al parámetro Eur (1.3%)</i>	<i>80</i>
<i>Figura 58. Sensibilidad de Y respecto al parámetro Eur (1.3%)</i>	<i>81</i>
<i>Figura 59. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Eur (1.3%)</i>	<i>82</i>
<i>Figura 60. Ampliación de la figura 58</i>	<i>82</i>
<i>Figura 61. Zonas Sensibles en X</i>	<i>85</i>
<i>Figura 62. Zonas Sensibles en Y</i>	<i>85</i>
<i>Figura 63. Asiento en Superficie de referencia con la escala vertical exagerada (0.08m max)</i>	<i>89</i>
<i>Figura 64. Comparativa de los asientos de cada parámetro con aumento del 1.3% respecto al asiento inicial.....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 65. Evolución de la pérdida de volumen en el túnel para todos los parámetros estudiados.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 66. mapa modelo de medición para la optimización de la instrumentación geotécnica</i>	<i>95</i>
<i>Figura 67. Visualización el 3D del mapa modelo de medición.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 68. mapa modelo de medición para obtener valores representativos de la presión de agua</i>	<i>96</i>

Índice de Tablas

<i>Tabla 1. Valores iniciales (por defecto) de los diferentes parámetros del modelo Hardening Soil</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 2. Valores iniciales (por defecto) de los diferentes parámetros del revestimiento del túnel</i>	<i>54</i>
<i>Tabla 3. Tabla Modelo de EXCEL utilizada para el cálculo de las derivadas horizontales y verticales. X e Y son las coordenadas de la geometría. Ux y Uy son los desplazamientos producidos en la geometría debido a la construcción del túnel y dX y dY son las respectivas derivadas de movimientos verticales y horizontales.</i>	<i>63</i>
<i>Tabla 4. Matriz de Sensibilidad en X para el aumento de 1.3%.....</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 5. Matriz de Sensibilidad en Y para el aumento de 1.3%.....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 6. Matriz de Sensibilidad global en X Cerca de rotura (1.3%).....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 7. Matriz de Sensibilidad global en Y cerca de rotura (1.3%).....</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 8. Datos de la superficie final y pérdida de volumen del túnel con los parámetros por defecto.....</i>	<i>89</i>
<i>Tabla 9. Valores de la pérdida de volumen con cada uno de los parámetros estudiados en el rango óptimo</i>	<i>90</i>

1. Introducción

En la construcción de túneles es imprescindible tener una buena planificación de la instrumentación geotécnica para medir y obtener datos sobre las diferentes variables que existen durante la construcción de la obra. La sociedad está más concienciada de que tiene que haber protocolos de seguridad cada vez más seguros para este tipo de obras civiles, lo que nos lleva en consecuencia a tener que obtener con más precisión datos que nos proporcionen una obra más segura y más eficiente.

En el caso de los túneles y concretamente en los túneles urbanos, es necesario tener una mejor planificación de la obra en etapas futuras para poder predecir hechos que puedan ocurrir durante la construcción, cómo cuáles serán los asentamientos en superficie debidos al túnel, como afectará la construcción de éste a la presión de agua existente en el terreno, etc. Hechos que están directamente relacionados con desencadenantes materiales (rotura o agrietamiento de edificios, carreteras, etc.) si dicha planificación no es buena.

En el aspecto técnico, por ejemplo, es necesaria una buena planificación de la instrumentación para poder hacer estudios y análisis retrospectivos. Gracias a éstos, podemos estudiar etapas futuras de la construcción del túnel sin haberse excavado aún y así hacer predicciones de comportamiento de la obra con más precisión. Esto conlleva tener una planificación de instrumentación geotécnica lo más precisa posible para saber cuál es el lugar más conveniente dónde medir en la zona de excavación, y así obtener unos parámetros geotécnicos consistentes que después permitirán hacer buenos análisis.

Gracias a los softwares existentes hoy en día, una de las cosas más importantes para llevar a cabo éste trabajo como es el análisis numérico, resulta fácil de calcular y obtener, facilitando el tiempo de cálculo de cientos de casos a varios minutos, cosa que hace unos años era imposible.

El propósito en éste trabajo final de grado es encontrar aquellas zonas del terreno excavado (simulación de la excavación de un túnel con máquina tuneladora) donde los movimientos del terreno (producidos por la excavación del túnel) respecto a los diferentes parámetros geotécnicos sean más sensibles y en consecuencia más fáciles de identificar con instrumentación geotécnica. Utilizando ciertos softwares, si nos fijamos en los movimientos que el terreno sufre debido a la excavación del túnel y

estudiamos las derivadas de éstos movimientos respecto al parámetro de interés, podemos obtener las zonas sensibles mencionadas anteriormente. En definitiva, queremos saber en qué zonas de la geometría prediseñada tenemos que medir para identificar parámetros geotécnicos y así hacer una buena optimización de la instrumentación geotécnica sin tener que desplegar un gran abanico de ésta en la obra y proporcionar un muestreo eficiente y certero. Gracias a softwares como PLAXIS y SURFER, este trabajo se ha podido realizar con mucha precisión tanto numérica como gráfica, proporcionándonos unos datos consistentes, partiendo de unas condiciones iniciales a la geometría y a los valores iniciales de los parámetros existentes para el estudio.

Esta optimización instrumental es posible, obteniendo los datos de la sensibilidad de los movimientos del terreno durante la excavación del túnel respecto al parámetro de interés que finalmente queremos obtener. Se observan cuales son los cambios o deformaciones horizontales y verticales que el terreno sufre entre el valor del parámetro inicial y el valor del parámetro en cuestión aumentado en un % respecto a su valor inicial. De ésta manera calculamos la derivada de las variables medidas respecto del parámetro en cuestión.

Una vez obtenidos estos datos numéricos con el software PLAXIS y procesados con Excel, nos centramos en crear con SURFER, mapas de la sensibilidad de los movimientos horizontales y verticales del terreno respecto al cambio de valor del parámetro, obteniendo así un mapa de isolíneas dónde podemos ver cuál es la zona más afectada de la geometría a ése cambio de valor del parámetro. De ésta manera obtenemos la zona más óptima dentro de la geometría prediseñada para identificar un parámetro geotécnico.

Numéricamente, éste fenómeno es demostrable observando lo que llamamos matriz de sensibilidad formada por las derivadas de las variables medidas respecto a los diferentes parámetros estudiados. Gracias a la matriz de sensibilidad podemos corroborar que parámetros son más sensibles a deformaciones del terreno y cuales menos (en dicha matriz, se tienen todas las deformaciones del terreno (nodos relevantes de la geometría) respecto a los diferentes parámetros que se quieren estudiar).

Un valor alto en la matriz de sensibilidad, indica una alta sensibilidad del parámetro a cambios deformacionales, es decir, las deformaciones del terreno debido al cambio del

parámetro son notorias, y por contrario, un valor bajo, indica poca sensibilidad, de ahí extraemos la información de cuando un parámetro geotécnico es sensible o no.

Finalmente, estudiado el caso de la Sensibilidad, podemos planificar una mejor planificación instrumental en la obra y proponer un diseño óptimo de la instrumentación.

2. Estado del Arte

Durante la década de los 80, los estudios dedicados a la optimización y al análisis retrospectivo sobre diferentes experimentos dentro de diferentes campos en el mundo de la ingeniería, empezaron a tener una mayor importancia. Algunos científicos, de diferentes campos como la ingeniería aeroespacial, ingeniería civil, etc., postularon sus estudios sobre backanálisis y optimización del problema en cuestión, en artículos científicos que han sido de gran ayuda para muchos casos posteriores, tanto en el aspecto práctico a nivel de cálculo computacional y precisión en campo, como en el aspecto teórico de formulación matemática.

T Haftka et al. (1998), por ejemplo, habla sobre un enfoque más teórico del diseño óptimo de experimentos. Centrado básicamente en cómo mejorar un experimento a partir de un estudio exhaustivo de la formulación matemática en un modelo representativo de la realidad, encontramos mucha teoría sobre el uso de la optimización analítica para el diseño de los experimentos proporcionando la máxima información posible sobre el fenómeno a investigar. El uso de los experimentos para realizar una optimización posterior (modelo matemático) o el uso de técnicas desarrolladas para optimización experimental en optimización numérica (reducción de cálculo computacional) son algunas de las principales cosas que se discuten en el artículo, teniendo como objetivo en cada una de ellas *la reducción de pasos de cálculo para llegar al valor buscado dentro del experimento o análisis.*

El aspecto importante extrapolable a cualquier experimento en este caso, es poder contar con un modelo numérico, que nos permita simular nuestro experimento en diferentes fases de estudio, de manera que podamos ahorrar costes en técnicas de laboratorio y/o maquinaria, ya que el coste de éstas puede llegar a ser muy elevado.

2.1. Necesidad de instrumentar en la construcción de túneles

Como en toda obra civil, tiene que haber unos procedimientos y estándares de control de obra, un seguimiento exhaustivo de cómo ésta evoluciona, si los movimientos en superficie, daños estructurales en edificaciones o estructuras colindantes están dentro de la tolerancia marcada como admisible, control de las variaciones en las presiones y niveles de agua que pueden afectar al desarrollo de la misma obra, etc.

A lo largo de los años, las técnicas de control de desarrollo de obra para túneles se han mejorado e incluso se han creado nuevas con instrumentación como GPS, fotogrametría, escáner láser, fibra óptica, etc. Existen diferentes técnicas para el control

externo de la obra (control en superficie, alrededores del túnel) y para el control interno (interior del túnel durante la excavación).

En nuestro caso, para éste trabajo, nos interesan más las medidas de control a nivel externo (entendemos por externo, aquellas técnicas no necesariamente solo en superficie, sino también técnicas donde el aparato medidor tenga que introducirse en el terreno mediante un sondeo, aunque fuera del túnel), como por ejemplo, medidores de movimientos del suelo (inclinómetros (Figura 1), extensómetros (Figura 2), micrómetros deslizantes, etc.) y variaciones del nivel de agua en el terreno debido a la excavación (medición con piezómetros).

Como se menciona en Ledesma (2003), los túneles son obras geotécnicas donde prevalece como método de control lo que se llama “*método observacional*” gracias a técnicas de auscultación (extensómetros, inclinómetros), cuyos resultados sobre movimientos en el terreno durante el desarrollo de la obra son tomados muy en cuenta para decisiones constructivas. Ésta idea del método observacional en ingeniería del terreno fue ya propuesta por Terzaghi (Terzaghi y Peck,1975).

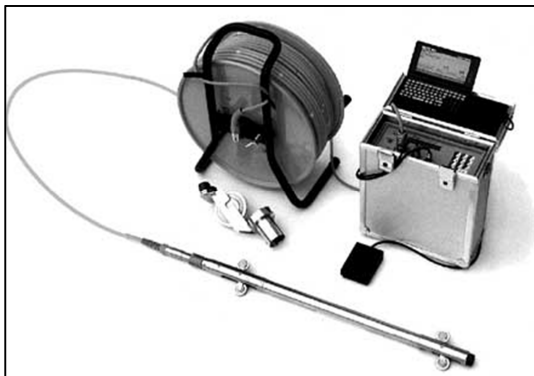


Figura 1. Inclinómetro

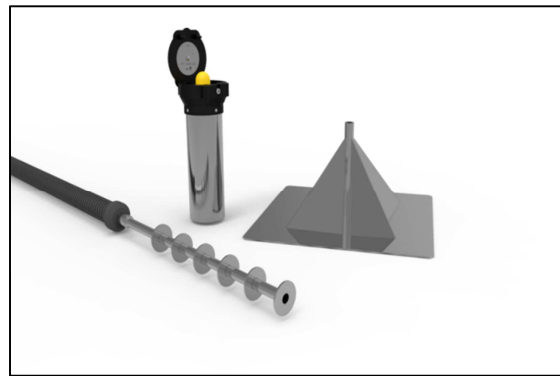


Figura 2. Extensómetro fijo

Por otro lado, existen los análisis retrospectivos. Mediante la simulación con software de la obra del túnel, podemos obtener otro tipo de control de obra, y predecir a priori los movimientos causados por el túnel en etapas posteriores sin tener que esperar a los datos que nos proporcionan los inclinómetros o extensómetros in situ. Nótese que el uso de la modelización mediante software no implica la supresión de técnicas de auscultación en campo. Es una herramienta más, a tener en cuenta, para el control de la obra.

2.2. Identificación de parámetros

La técnica del análisis retrospectivo o backanálisis, se basa en la comparación de un modelo con la realidad. La diferencia entre ambas se atribuye a un error de medida. Los parámetros geotécnicos que mejor simulan la realidad son aquellos que minimizan ese error.

Es decir, sabiendo, valores de auscultación como movimientos del terreno, presiones de agua, etc. el parámetro que haga mínima la diferencia mínima entre los valores de movimientos “reales” (auscultación) y los valores calculados, será el parámetro del terreno buscado. Una de las funciones más conocidas para minimizar la diferencia entre dos variables o valores dados, es la expresión de mínimos cuadrados:

$$J = \sum_{i=1}^m (x_i^* - x_i)^2 \quad [2.1]$$

Aunque más adelante se verá que la formulación utilizada para obtener el mejor ajuste es bastante más compleja. En caso de discrepancia entre los valores de auscultación y los calculados, puede suponerse que el valor del parámetro tomado como referencia inicialmente debe ser corregido, siempre que el modelo se tome como correcto.

De esta manera, con los medios actuales y con suficientes medidas de auscultación, es posible llevar a cabo dichos estudios de manera bastante automática y que el análisis retrospectivo sea una técnica de control de excavación continuada.

Así pues, el objetivo es la minimización de una función, función denominada “función objetivo” (Ledesma, 2003).

Como hemos visto, gracias al análisis retrospectivo podemos conseguir valores muy representativos, de parámetros del terreno, como el módulo elástico (E), el coeficiente de empuje al reposo (K_o), la cohesión (C), etc. Pero, se ha demostrado que dependiendo de dónde se instale la auscultación, la información que se puede obtener sobre los movimientos del terreno así como el valor de parámetros geotécnicos puede diferir.

2.3. Sensibilidad del parámetro y optimización de la región óptima

En este apartado se introduce un nuevo concepto importante en el trabajo, la sensibilidad de la medida respecto al parámetro a obtener. Como se menciona en Murakami et al (1988), dentro de una nube o región de puntos observada, se toman los puntos teniendo en cuenta la sensibilidad de los coeficientes. Estos coeficientes se definen como las derivadas parciales de los movimientos del terreno o desplazamientos, respecto a los parámetros que queramos obtener:

$$S = \frac{\partial u}{\partial P} \quad [2.2]$$

Donde u representa el movimiento del terreno, horizontal o vertical y P representa un parámetro de interés como K_0, C, φ, E , etc. Partiendo de un caso base, si se realizan cálculos iterativos con diferentes valores del parámetro a conocer (suponiendo un valor inicial) se puede ver si los resultados obtenidos entre cada caso calculado han diferido mucho o no respecto al caso base y entre los mismos calculados. En el caso de un cambio notorio entre los resultados obtenidos, se procedería a catalogar dichos movimientos respecto al parámetro en concreto como sensibles, ya que debido al cambio de valor de dicho parámetro, los movimientos en el terreno habrían sido variables. En caso de no haber cambios (o cambios mínimos) en los movimientos del terreno, se catalogaría a dichos movimientos respecto al parámetro como no sensibles, ya que los diferentes cambios de valor propuestos para los cálculos no habrían producido grandes variaciones de movimientos en el terreno.

Por otro lado, en Ledesma (2003) se habla de otro método más matemático, para conseguir un mejor diseño de la auscultación a partir de la identificación de parámetros. La manera descrita en su artículo es mediante el cálculo de la matriz de covarianzas de los parámetros identificados:

$$\mathbf{C}_P = [\mathbf{A}^t \mathbf{C}_x^{-1} \mathbf{A}]^{-1} \quad [2.3]$$

Donde la matriz \mathbf{A} es la matriz de sensibilidad, similar a la ecuación [2.2], que proporciona información adicional sobre la estructura del modelo y como variables y parámetros están relacionados y donde \mathbf{C}_x^{-1} es la inversa de la matriz de covarianzas de los errores de las medidas.

Dicha matriz \mathbf{C}_P , depende de los parámetros y del punto considerado así que la instrumentación debería colocarse en aquellos puntos que para los parámetros finales, den menos valor en las componentes de la matriz [2.3]. El estudio de la matriz de covarianzas de los parámetros (\mathbf{C}_P), debe realizarse para cada paso, pero en Ledesma

(2003) se indica que es difícil optimizar la disposición de la instrumentación en general. No obstante, si se dispusiera de un modelo analítico, sería posible obtener la expresión analítica de los términos de [2.3] y finalmente saber donde sería más conveniente hacer las mediciones con la instrumentación de auscultación.

Gracias a la localización de los puntos óptimos dentro de una zona delimitada del terreno durante la construcción de la obra, podemos, por lo tanto, llevar a cabo una optimización de la instrumentación geotécnica, midiendo en las zonas más óptimas para obtener mejores resultados sobre parámetros geotécnicos. De aquí surge otra de las palabras importantes introducidas en el título de éste trabajo, la optimización.

En éste trabajo, se ha optado por un procedimiento más parecido al estudiado por Murakami et al (1988), ya que disponemos de un software potente para hacer cálculos iterativos con mucha precisión y en un tiempo relativamente bajo, como nos permite PLAXIS. Éste programa de cálculo resuelve el problema mecánico tensión-deformación para un medio continuo por elementos finitos y en un contexto específico de ingeniería del terreno. En siguientes puntos del trabajo, veremos aspectos técnicos referentes a la matemática de la identificación de parámetros y la obtención de la zona óptima de medición así como información sobre el software utilizado y los diferentes métodos útiles con los que se han comparado resultados obtenidos en nuestro caso a estudiar.

3. Diseño Óptimo

Para estudiar el diseño óptimo, nos tenemos que fijar primero en el planteamiento matemático para identificar parámetros a partir de las medidas de auscultación. Aunque nuestro trabajo sea más gráfico que técnico a la hora de encontrar regiones óptimas de sensibilidad de parámetros, se considera que éste apartado es de vital importancia para entender el procedimiento que en apartados posteriores se mostrará.

3.1. Planteamiento

Según Ledesma (2003), el problema de la identificación de parámetros mediante medidas de auscultación, puede plantearse de la manera siguiente:

Suponemos que disponemos de un modelo que se considera cierto y que relaciona unos parámetros con unas variables que se pueden medir como por ejemplo disponer de una malla de elementos finitos que consideramos correcta (es decir, su geometría, estratos, etc. son correctos). Una forma entonces de representar el modelo sería mediante la expresión $\mathbf{x}=\mathbf{M}(\mathbf{p})$, donde \mathbf{x} representaría un vector de variables que se pueden medir (por ejemplo desplazamientos del terreno debido a la construcción de un túnel, construcción de muros pantalla, etc.), \mathbf{p} sería un vector de parámetros que en la etapa de diseño se supone conocido, y \mathbf{M} representaría un modelo que relaciona ambos. En muchos casos, se tiene que tener en cuenta que la relación \mathbf{M} será no lineal y en general no tendrá una expresión analítica.

En general, habrá una discrepancia entre las medidas \mathbf{x}^* y las predicciones del modelo. Esa discrepancia se considera un error de medida, ya que el modelo se supone correcto. Además puede haber también un error de medición. El objetivo del proceso de identificación es encontrar los parámetros \mathbf{p}^* que mejor ajusten las variables calculadas a las medidas tomadas. Un criterio muy usado para este tipo de ajustes, es el conocido método de “mínimos cuadrados” que encuentra el mejor ajuste minimizando la diferencia de las variables medidas y las calculadas al cuadrado:

$$J = \sum_{i=1}^m (x_i^* - x_i)^2 \quad [3.1]$$

Dónde “ m ” es el número de medidas y J es la función objetivo que hay que minimizar. En la ecuación [3.1], x_i representa las variables calculadas con el conjunto de parámetros \mathbf{p}^* utilizando el modelo planteado anteriormente.

También existen otras alternativas al criterio de identificación de mínimos cuadrados. Otro enfoque según Ledesma (2003), es suponer que los parámetros idóneos son aquellos que maximicen la verosimilitud, L , de una cierta hipótesis, \mathbf{p} , dado un conjunto de variables medidas \mathbf{x}^* . Dicha verosimilitud, se define como proporcional a la probabilidad condicional de \mathbf{x}^* dados unos parámetros \mathbf{p} :

$$L(\mathbf{p}) = k f(\mathbf{x}^*/\mathbf{p}) \quad [3.2]$$

Donde k es una constante de proporcionalidad arbitraria. Si como hemos mencionado antes, las diferencias entre variables medidas y calculadas se atribuyen a un error de medida en campo, la probabilidad de que se obtuvieran dichos errores podría expresarse mediante una distribución multivariante de Gauss:

$$P(\mathbf{x}) = |C_x|^{1/2} (2\pi)^{-m/2} \exp \left\{ \frac{1}{2} (\mathbf{x}^* - \mathbf{x})^t C_x^{-1} (\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) \right\} \quad [3.3]$$

Donde C_x es la matriz de covarianzas de los errores de las medidas y “ m ” el número de medidas. La verosimilitud será por tanto proporcional a la ecuación [3.3]. Maximizar por lo tanto, la verosimilitud L , equivale a minimizar la función $S = -2 \ln L(\mathbf{p})$, resultando:

$$S = (\mathbf{x}^* - \mathbf{x})^t C_x^{-1} (\mathbf{x}^* - \mathbf{x}) + \ln |C_x| + m \ln(2\pi) - 2 \ln(k) \quad [3.4]$$

Observamos que si la estructura del error de las medidas es fija y conocida, únicamente el primer término de la ecuación [3.4] interviene en el proceso de minimización. La matriz de covarianzas puede interpretarse como una matriz de pesos que pondera la contribución de cada medida en la función objetivo según el inverso de su error. En particular, si todas las medidas son independientes y tienen el mismo error, entonces $C_x = \sigma^2 \mathbf{I}$ donde σ^2 es la varianza e \mathbf{I} es la matriz identidad. En ese caso, el primer término de la ecuación [3.4] se reduce al criterio de mínimos cuadrados, es decir, el mínimo de la ecuación [3.4] es también el mínimo de la ecuación [3.1].

La utilización del criterio de máxima verosimilitud tiene ciertas ventajas conceptuales y además admite generalizaciones al caso en que se disponga de información previa sobre los parámetros, o al caso en que se disponga de medidas de diferente tipo (por ejemplo desplazamientos y presiones de agua) cada una de ellas con su respectivo error. En Gens y Ledesma (2000) se encuentra más información sobre éste último caso.

3.2. Minimización de la función objetivo

El primer término de la ecuación [3.4] es una función que depende de los parámetros:

$$J = (x^* - x)^t C_x^{-1} (x^* - x) \quad [3.5]$$

Ya que $\mathbf{x} = \mathbf{M}(\mathbf{p})$. El mínimo proporciona los parámetros que mejor ajustan las medidas realizadas con el modelo seleccionado. Si \mathbf{M} es lineal, la ecuación [3.5] será no lineal. Por lo tanto, el problema de identificación de parámetros o problema inverso es matemáticamente más complejo que el problema directo. Si el modelo está definido a través del Método de los Elementos Finitos se hace imprescindible recurrir a los algoritmos numéricos de optimización disponibles. En general para este tipo de problemas es más adecuado usar algoritmos que utilicen el gradiente de la ecuación [3.5], porque suelen ser más eficientes.

Los algoritmos de minimización de [3.5] avanzan en el espacio de parámetros, de manera que se parte de unos parámetros iniciales y se avanza de forma iterativa como:

$$p_{k+1} = p_k + \Delta p_k \quad [3.6]$$

Uno de los algoritmos más utilizados para este tipo de problemas es el de Gauss-Newton (Ledesma 2003), y su variante denominada de Levenberg-Marquardt. La expresión del incremento de parámetros es en este caso:

$$\Delta p_k = (A_k^t A_k + \mu I)^{-1} A_k^t \Delta x_k \quad [3.7]$$

Donde \mathbf{A} es la matriz de **sensibilidad** que se calcula en cada iteración “k” como:

$$\mathbf{A} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{p}} \quad [3.8]$$

y μ es un escalar que se controla la velocidad de convergencia y que se hace tender a cero cerca del mínimo.

La matriz de sensibilidad \mathbf{A} , proporciona información adicional sobre la estructura del modelo y cómo variables y parámetros están relacionados, como se ha mencionado anteriormente en el punto 2.3 de éste trabajo. En general, \mathbf{A} , es una matriz no cuadrada “m x n” donde “m” es el número de medidas y “n” el de parámetros. Valores altos de la matriz \mathbf{A} contribuyen a disminuir el error de la identificación. Éste puede estimarse mediante la matriz de covarianzas de los parámetros calculable según la ecuación [2.3] mostrada anteriormente. Esta expresión permite estimar cómo los errores de las medidas se transmiten a través del modelo y condicionan el error de los parámetros identificados.

3.3. Relación con el Método de los Elementos Finitos

Como se explica en Ledesma (2003), en muchos análisis o estudios de problemas reales se utiliza el Método de los Elementos Finitos, que gracias a su versatilidad permite adaptarse a geometrías y situaciones muy complejas. En algunos casos, es posible acoplar el cálculo de la matriz de sensibilidad definida en la ecuación [3.8] con el propio método.

Para el caso de modelos más complejos, como por ejemplo los casos elastoplásticos, es difícil obtener una expresión que permita evaluar la matriz de sensibilidad utilizando la formulación propia del Método de los Elementos Finitos, en ese caso pues, se debe recurrir a una estimación de la matriz de sensibilidad usando el concepto numérico de derivada:

$$\frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{p}} = \frac{\mathbf{x}(\mathbf{p} + \Delta \mathbf{p}) - \mathbf{x}(\mathbf{p})}{\Delta \mathbf{p}} \quad [3.9]$$

donde $\Delta \mathbf{p}$ es un incremento de un parámetro que debe ser suficientemente pequeño y que se decide previamente tras algunos tanteos. La expresión de la ecuación [3.9] es totalmente general y permite aplicar el método a cualquier ley constitutiva.

En general es posible acoplar un código de elementos finitos a un algoritmo de minimización. Obsérvese que en una iteración tipo es preciso evaluar la ecuación [3.9]. en general se necesitarán tantos análisis directos como números de parámetros más uno. Una vez estimada la matriz de sensibilidad, se puede continuar con el proceso iterativo siguiendo los pasos de la ecuación [3.7] avanzando así en el espacio de parámetros hacia el mínimo deseado.

Cabe destacar que en éste trabajo no se pretende desarrollar un proceso de identificación de parámetros sino que se desea analizar la matriz \mathbf{A} (ecuación [3.8]) calculada según la ecuación [3.9] en los problemas típicos de excavación de túneles.

4. Programa de Cálculo: PLAXIS

En este capítulo se describen brevemente algunas de las características del programa de cálculo PLAXIS (Brinkgreve, 2002) dónde también se exponen 3 métodos de cálculo (Elástico, Mohr-Coulomb y Hardening Soil) de los cuales uno de ellos es escogido para el cálculo del túnel. Al final de éste punto se exponen las razones por la cual se ha escogido uno de los 3 métodos para llevar a cabo la simulación de la obra. Dicha información nombrada anteriormente se ha obtenido del manual de PLAXIS versión 8 (English Manual) así como casi todas las referencias existentes en este punto del trabajo. Dichas referencias halladas en el Manual se identifican por las Siglas (R.M.P.: Referencia Manual de Plaxis). El desarrollo del programa PLAXIS empezó en 1987 en la Universidad Politécnica de Delft, como una iniciativa del departamento de obras públicas y administración de aguas. El principal objetivo fue el desarrollo de un programa de código de elementos finitos de fácil uso en 2D para el análisis de terraplenes de suelos blandos bajo el nivel del mar. En los años posteriores, el uso de Plaxis fue extendido para cubrir áreas de la ingeniería geotécnica. Gracias al crecimiento del uso del programa, se creó la compañía Plaxis b.v. en 1993. En 1998 se creó la primera versión del software para el sistema operativo Windows. Durante ese mismo periodo de tiempo, se llevó a cabo el desarrollo de la herramienta de cálculo en 3D del programa. Finalmente, después de años de desarrollo y mejora del programa, en 2001 se desarrolló PLAXIS 3D Tunnel program.

Los principales objetivos de la creación de PLAXIS son intentar proveer una herramienta para el análisis de problemas prácticos en la ingeniería geotécnica, siendo éste usado por ingenieros dedicados al campo de la geotecnia, que no tienen que ser necesariamente expertos numéricos. Bastante a menudo, algunos ingenieros consideraban que los programas no lineales de cálculo de elementos finitos son incómodos y requieren de un consumo de tiempo para el cálculo demasiado elevado. El equipo de búsqueda y desarrollo de PLAXIS tuvo en cuenta esos aspectos y trataron ese problema diseñando un programa robusto a nivel teórico y computacional. Como resultado, muchos ingenieros geotécnicos alrededor del mundo han adoptado PLAXIS como un programa sólido para cálculos geotécnicos reales, siendo así uno de los softwares más usados hoy en esta área de la ingeniería.

4.1. Modelos constitutivos

Dentro del programa Plaxis encontramos diferentes modelos constitutivos con los que podemos calcular y modelar un caso real de ingeniería geotécnica. Dependiendo de cuáles sean nuestras características del terreno, deberemos optar por un modelo u otro, ya que no todos están enfocados para el mismo tipo de análisis. A continuación se hace un breve resumen de todos los modelos de cálculo que Plaxis 2D-Versión 8 ofrece.

4.1.1. Modelo Elástico(EM)

En el manual de PLAXIS no se hace una referencia explícita sobre el modelo constitutivo elástico, posiblemente porque no es un método que se suele utilizar para cálculos geotécnicos ya que cómo sabemos el caso elástico es un caso ideal del comportamiento del material frente a fuerzas activas externas sobre el cuerpo que se estudia. Independientemente del manual de PLAXIS, se procede a explicar cuáles son las características principales del modelo. Dos de los parámetros importantes a los que se tiene que hacer referencia son el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν) ya que son los dos parámetros básicos que el usuario debe introducir en el programa para modelar su caso práctico.

4.1.2. Modelo Mohr-Coulomb (MC)

El modelo Mohr-Coloumb es un modelo elastoplástico que involucra 5 parámetros para resolver el problema en cuestión. Estos parámetros son el módulo elástico del terreno (E) y el coeficiente de Poisson (ν) en la parte elástica, ángulo de fricción interna (ϕ) y la cohesión (c) en la parte plástica y el ángulo de dilatancia (ψ). El modelo de Mohr-Coloumb representa una aproximación de “primer orden” para el comportamiento de suelos y rocas. Éste modelo es recomendado para un primer análisis del problema en cuestión a estudiar. Para cada capa de suelo (estrato), se estima una rigidez media constante. Debido a esta rigidez media, el cálculo computacional suele ser normalmente rápido y el programa obtiene un primer resultado de las deformaciones del terreno en el problema. A pesar de los 5 parámetros mencionados anteriormente, las condiciones iniciales del terreno juegan un papel esencial en la mayoría de problemas de deformación del terreno. La tensión horizontal inicial del terreno tiene que ser generada seleccionando los valores de K_0 apropiados.

4.1.3. Modelo Hardening Soil (HSM)

El modelo Hardening-Soil es un avanzado modelo de simulación de comportamiento del terreno. Como en el modelo de Mohr-Coloumb, los estados tensionales son descritos por medio del ángulo de fricción interna (ϕ), la cohesión (c) y el ángulo de dilatancia (ψ). Sin embargo, la rigidez del suelo es descrita mucho más acuradamente usando tres tipos diferentes de rigidez:

El módulo de carga triaxial (E_{50}), el módulo de Carga-Descarga (E_{ur}) y el módulo Edométrico (E_{oed}). Como valores medios para varios tipos de suelos, se tiene que $E_{ur} \approx 3E_{50}$ y $E_{oed} \approx E_{50}$, pero si ambos suelos son muy rígidos o muy blandos tienden a dar otra relación E_{oed}/E_{50} . Comparándolo con el modelo de Mohr-Coloumb, el Hardening-Soil Model también tiene en cuenta la dependencia de tensión del módulo de rigidez. Eso significa que todo incremento de rigidez aumenta con el incremento de presión (a medida que se baja en profundidad, la rigidez cambia debido a que hay un incremento de presión litoestática. El estado tensional de referencia se adopta teniendo en cuenta una presión normalmente de 100 KPa (1bar).

4.2. Modelo Constitutivo Elástico

En el manual de PLAXIS no se hace una referencia sobre el modelo constitutivo elástico, posiblemente porque no es un método que se suele utilizar para cálculos geotécnicos ya que como sabemos el caso elástico es un caso ideal del comportamiento del material frente a fuerzas activas externas sobre el cuerpo que se estudia. Independientemente del manual de PLAXIS, se procede a explicar cuáles son las características principales del modelo y cuáles son las ecuaciones en las que éste basa.

En *Prat (2006)*, se explica el requerimiento de considerar una descripción matemática de la tensión y la deformación en los fundamentos básicos de la mecánica del medio continuo. Se tienen ecuaciones de equilibrio para el aspecto tensional y ecuaciones de compatibilidad en el aspecto deformacional sin embargo estas ecuaciones no son suficientes para resolver el problema de tensión deformación. Para ello, sería necesario contar con unas ecuaciones que caracterizaran cada tipo de material y su reacción particular a las cargas aplicadas. Estas ecuaciones, se conocen con el nombre de ***ecuaciones constitutivas***, ya que describen el comportamiento macroscópico que resulta de la constitución interna del material.

En la teoría clásica de la elasticidad lineal, se denomina idealmente elástico a aquel cuerpo que recupera su forma original de manera total una vez las fuerzas causantes de la deformación sobre el cuerpo son retiradas y cuando (para una cierta temperatura) existe una relación biunívoca entre los estados de tensión y deformación:

$$\text{Material} \quad \sigma_{ij} = E_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad [4.1]$$

La relación más simple elástica entre tensión y deformación (*Material elástico de Cauchy*) es del tipo:

$$\sigma_{ij} = F_{ij} (\varepsilon_{kl}) \quad [4.2]$$

Donde F_{ij} representa una función tensorial de las deformaciones, sin ninguna restricción. Esta formulación implica lo siguiente:

- Reversibilidad (no hay deformaciones permanentes)
- Independencia entre tensión y trayectoria de deformaciones (solo dependen de valores instantáneos)
- Se puede generar energía en ciclos de carga y descarga
- Se pueden violar leyes termodinámicas

Centrándonos en un problema básico con comportamiento elástico lineal general, la ley constitutiva que muestra o define este hecho es:

$$\sigma_{ij} = \mathbf{E}_{ijkl} \varepsilon_{kl} \quad [4.3]$$

Por simetría de los tensores de tensiones y deformaciones ($\sigma_{ij} = \sigma_{ji}$, $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$) solo hay seis términos independientes en σ_{ij} y en ε_{ij} . Por lo tanto el tensor de rigidez elástico \mathbf{E} puede tener como máximo 36 constantes independientes (dado que \mathbf{E}_{ijkl} es igual a todas sus otras combinaciones con los subíndices). Para el caso más general de un material elástico de Cauchy, se sabe que:

- Para un material hiperelástico, la matriz de rigidez debe ser simétrica ($\mathbf{E}_{ijkl} = \mathbf{E}_{klij}$) y por lo tanto solo puede tener 21 constantes independientes.
- Si existe un plano de simetría, hay 13 constantes independientes.
- Si existen 3 planos de simetría (ortotropía), hay 9 constantes independientes.
- Si existe un eje de simetría (anisotropía transversal), hay 5 constantes independientes.
- Si existen tres ejes de simetría (isotropía), hay 2 constantes independientes.

4.2.1. Problemas 1D y 2D

En estas condiciones, la única componente no nula del tensor de tensiones es σ_{11} . aquí entran en juego dos parámetros importantes, en los que el usuario de PLAXIS debe introducir en el software para modelar el caso práctico a resolver. Se definen de ésta manera el módulo de Young (E) y el coeficiente de Poisson (ν) como:

$$E = \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu} \quad [4.4]$$

$$\nu = \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)} \quad [4.5]$$

Donde λ y μ son los coeficientes de Lamé. Recordemos que en el caso elástico tenemos las condiciones restrictivas de $E > 0$ y $-1 < \nu < 1/2$.

En nuestro caso, hablaríamos de un problema en 2D y consecuentemente estaríamos tratando un problema de deformación plana en PLAXIS. Un ejemplo típico de deformación plana sería entonces la construcción de un túnel o una presa de tierras en que no existen cargas aplicadas en la dirección longitudinal de la estructura. En este caso, matricialmente podríamos definir la relación de tensión-deformación de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad [4.6]$$

Finalmente, para el caso elástico, se cuenta también con otro apartado que es la elasticidad no lineal. Básicamente en la elasticidad no lineal, se estudian las leyes elásticas no lineales, que son aquellas en las cuales aun no habiendo una deformación permanente, no existe una proporcionalidad entre la tensión y la deformación aplicada al cuerpo en cuestión. En elasticidad no lineal, el tensor de rigidez elástico ya no es una matriz de coeficientes constantes, sino que estos coeficientes ahora dependen de las tensiones o las deformaciones aplicadas. Para más información sobre elasticidad no lineal consultar el apartado 2.6 *Elasticidad no lineal* en Prat, (2006).

4.3. Modelo Constitutivo Mohr-Coloumb (Plasticidad Perfecta)

La plasticidad está asociada al desarrollo de deformaciones irreversibles en los cuerpos, es decir, la deformación de un cuerpo en zona plástica es una deformación no recuperable (figura 3). Para evaluar si la plasticidad se da o no en el cálculo del problema, se define una función de fluencia f .

Esta función de fluencia puede normalmente presentarse como una superficie en el espacio de tensiones principales. Un modelo perfectamente plástico es un modelo constitutivo con una superficie de fluencia fija. Para el estado tensional representado por puntos dentro de la superficie de fluencia, el comportamiento es puramente elástico y todas las deformaciones son reversibles.

4.3.1. Comportamiento elástico-plástico perfecto

El principio básico de la elastoplasticidad es que las deformaciones y los relaciones deformacionales son descompuestos en una parte elástica y otra parte plástica:

$$\underline{\underline{\epsilon}} = \underline{\underline{\epsilon}}^e + \underline{\underline{\epsilon}}^p \quad \underline{\underline{\dot{\epsilon}}} = \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e + \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p \quad [4.7]$$

La ley de Hooke se usa para mostrar cómo se relacionan la tensión y la deformación elástica. Si se sustituye la ecuación 4.1 por la ley de Hooke se tiene que:

$$\text{ley de Hooke (1D)} \quad \sigma = E \epsilon \quad [4.8]$$

$$\underline{\underline{\dot{\sigma}}} = \underline{\underline{D}}^e \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^e = \underline{\underline{D}}^e (\underline{\underline{\dot{\epsilon}}} - \underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p) \quad [4.9]$$

Teniendo en cuenta la teoría clásica de plasticidad (Hill, 1950) (R.M.P), las deformaciones plásticas son proporcionales a las derivadas de la función de fluencia respecto a las tensiones. Esto significa, que las deformaciones plásticas pueden ser representadas como vectores perpendiculares a la superficie de fluencia. Esta parte de la teoría clásica, es referida como a una plasticidad asociada, pero, sin embargo, para el método de Mohr-Coloumb con las funciones de fluencia, la teoría de la plasticidad asociada conduce a una sobre predicción de la dilatación.

En ese caso, además de la función de fluencia, se introduce una función de potencial plástico g . El caso $g \neq f$ es denotado como plasticidad no asociada. En general, las deformaciones plásticas son escritas como:

$$\underline{\underline{\dot{\epsilon}}}^p = \lambda \frac{\partial g}{\partial \underline{\underline{\sigma}}} \quad [4.10]$$

Donde λ es el multiplicador plástico. En puro comportamiento elástico, λ es 0 (figura 3), mientras que en el caso de comportamiento plástico λ es positiva:

$$\lambda = 0 \quad \text{para: } f < 0 \quad \text{o:} \quad \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\dot{\epsilon}} \leq 0 \quad (\text{Elasticidad}) \quad [4.11]$$

$$\lambda = 0 \quad \text{para: } f < 0 \quad \text{y:} \quad \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \underline{\dot{\epsilon}} > 0 \quad (\text{Plasticidad}) \quad [4.12]$$

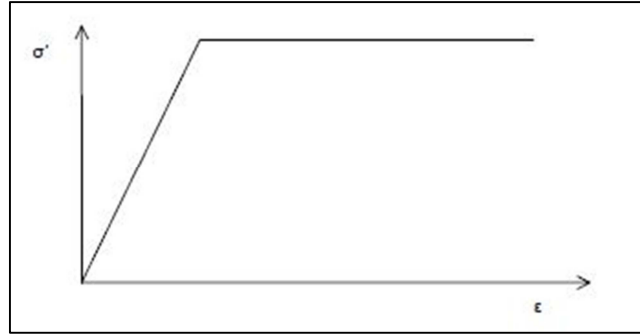


Figura 3. Gráfico Tensión-Deformación de un material elastoplástico perfecto en 1D.

Estas ecuaciones deberían ser usadas para obtener la siguiente relación entre la tensión efectiva y la deformación debida a elastoplasticidad (Smith & Griffith, 1982; Vermeer & de Borst, 1984) (R.M.P):

$$\underline{\dot{\sigma}'} = \left(\underline{D}^e - \frac{\alpha}{d} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \right) \underline{\dot{\epsilon}} \quad [4.13]$$

Dónde:

$$d = \frac{\partial f^T}{\partial \underline{\sigma}'} \underline{D}^e \frac{\partial g}{\partial \underline{\sigma}'} \quad [4.14]$$

El parámetro α es usado como un interruptor. Si el comportamiento del material en cuestión es elástico, como se define en la ecuación 4.5, el valor de α es 0, mientras que para el caso de un comportamiento plástico, definido en la ecuación 4.6, el valor de α sería 1.

La teoría de la plasticidad mencionada arriba se ha ilustrado para una superficie de fluencia llana y esta no cubre el contorno de varias superficies de fluencia como se ha presentado en el modelo Mohr-Coloumb. Para tal superficie de fluencia, la teoría de la plasticidad fue extendida por Koiter (1960) (R.M.P) y otros, para tener en cuenta vértices implicando 2 o más funciones plásticas potenciales:

$$\underline{\dot{\epsilon}}^p = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \underline{\sigma}'} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \underline{\sigma}'} + \dots \quad [4.15]$$

De la misma manera, algunas funciones de fluencia independientes (f_1, f_2, \dots) son usadas para determinar la magnitud de los multiplicadores ($\lambda_1, \lambda_2, \dots$).

4.3.2. Formulación del modelo Mohr-Coloumb

La condición de fluencia del modelo Mohr-Coloumb es una extensión de la ley de fricción de Coulomb en los estados de tensión generales. De hecho, la condición asegura que la ley de fricción de Coulomb es obedecida por cualquier plano dentro de un elemento material. La Superficie de fluencia de Mohr-Coloumb (figura 4) consiste en seis funciones de fluencia formuladas en términos de tensiones principales (ver Smith & Griffin, 1982) (R.M.P):

$$f_{1a} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad [4.16]$$

$$f_{1b} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad [4.17]$$

$$f_{2a} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad [4.18]$$

$$f_{2b} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad [4.19]$$

$$f_{3a} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad [4.20]$$

$$f_{3b} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin\varphi - c \cos\varphi \leq 0 \quad [4.21]$$

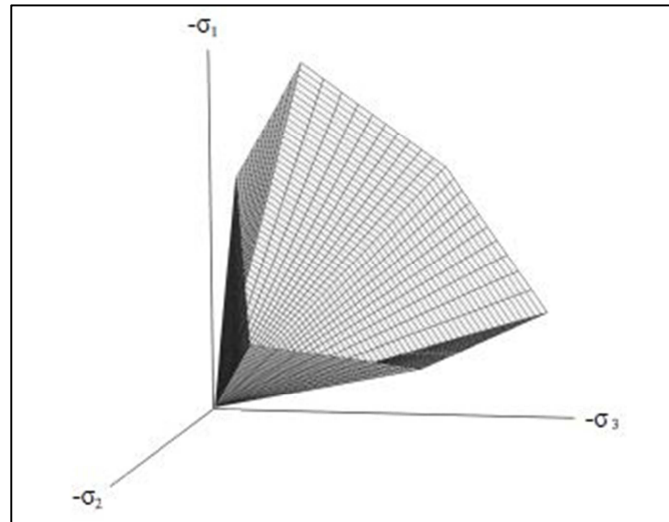


Figura 4. Superficie de fluencia de Mohr-Coulomb en ejes de tensiones principales (c=0)

Los dos parámetros del modelo plástico que aparecen en las funciones de fluencia son los conocidos ángulos de fricción interna (φ) y la cohesión (c). Estas funciones de

fluencia juntas, representan la pirámide hexagonal en el espacio de tensiones principales mostrado en la Figura 4.

Además de las funciones de fluencia, seis potenciales plásticas son definidas en el modelo de Mohr-Coloumb:

$$g_{1a=} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin\psi \quad [4.22]$$

$$g_{1b=} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2) \sin\psi \quad [4.23]$$

$$g_{2a=} = \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin\psi \quad [4.24]$$

$$g_{2b=} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin\psi \quad [4.25]$$

$$g_{3a=} = \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin\psi \quad [4.26]$$

$$g_{3b=} = \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1) \sin\psi \quad [4.27]$$

El potencial plástico contiene un parámetro plástico, el ángulo de dilatación ψ . Este parámetro es necesario para modelar incrementos tensionales plásticos volumétricamente positivos (dilatación) como normalmente se ha observado en suelos densos. Al final de este punto se describen todos los parámetros usados para el modelo de Mohr-Coloumb.

Cuando se implementa el modelo de Mohr-Coulomb para estados de tensión generales, se necesita un trato especial para cuando dos superficies de fluencia se cortan. Algunos programas usan una transición suave de una superficie de fluencia a otra, por ejemplo el redondeado de las esquinas en las superficies (ver ejemplo Smith & Griffith, 1982) (R.M.P). Sin embargo, en PLAXIS se implementa la forma exacta del modelo de Mohr-Coloumb, usando así una transición bastante aguda de una superficie de fluencia a la otra. Para una descripción más detallada del tratamiento de los vértices en las superficies de fluencia el lector puede extraer la información de la literatura escrita (Koiter, 1960; van Langen & Vermeer, 1990) (R.M.P).

Para una cohesión $c > 0$, el criterio estándar de Mohr-Coloumb permite tracción. De hecho, el esfuerzo tensional permisible crece con la cohesión. En realidad, un suelo no puede aguantar ningún o un esfuerzo de tracción muy pequeño. Este comportamiento del suelo, puede ser incluido en el análisis de PLAXIS especificando una ruptura o corte.

En este caso, la zona con los estados tensionales principales de tracción no son permitidos. El corte de tensión introduce tres funciones de fluencia adicionales, definidas como:

$$f_{4=} = \sigma'_1 - \sigma'_t \leq 0 \quad [4.28]$$

$$f_{5=} = \sigma'_2 - \sigma'_t \leq 0 \quad [4.29]$$

$$f_{6=} = \sigma'_3 - \sigma'_t \leq 0 \quad [4.30]$$

Cuando este procedimiento de corte es usado, el esfuerzo tensional permisible σ_t , es por defecto igual a 0. Para estas tres superficies de fluencia se adopta también una regla de flujo asociada. Para estados tensionales dentro la superficie de fluencia, el comportamiento es elástico y obedece la ley de Hooke para elasticidad lineal isotrópica, como se menciona en la sección 2.2 del Manual de PLAXIS. Por lo tanto, además de los parámetros plásticos c, φ y ψ , se necesita introducir un Módulo de Young E y un coeficiente de Poisson ν .

4.3.3. Parámetros básicos del modelo Mohr-Coulomb

El modelo de Mohr-Coloumb necesita un total de 5 parámetros, que normalmente pueden ser obtenidos a partir de ensayos básicos sobre las muestras de suelo que tengamos para estudiar. La lista de los diferentes parámetros se muestra a continuación:

E :	Modulo de Young	[kN/m ²]
ν :	Coeficiente de Poisson	[-]
φ :	Ángulo de fricción interna	[°]
c :	Cohesión	[kN/m ²]
Ψ :	Ángulo de dilatación	[°]

En la siguiente figura que se muestra a continuación (figura 5) se presenta la pantalla de PLAXIS donde se pueden introducir cada uno de estos parámetros.

Figura 5. Tabla de introducción de parámetros en PLAXIS

4.3.3. 1. Módulo de Young (E)

PLAXIS usa el módulo de Young como rigidez básica dentro del modelo elástico y Mohr-Coloumb, pero algunas otras alternativas de módulos de rigidez son presentadas también. El módulo de rigidez tiene unidades de tensión. Los valores adoptados sobre la rigidez del parámetro en los cálculos, requiere especial atención como muchos geomateriales que muestran un comportamiento no lineal desde el buen comienzo de la carga a al que se someten. En mecánica de suelos el gradiente inicial es normalmente indicado como E_0 y el modulo secante al 50% de fuerza se le denota como E_{50} (Figura 6). Para materiales con un gran rango elástico lineal es realista usar E_0 pero para cargas de suelos generalmente se usa E_{50} . En problemas de descarga en el suelo, como en el caso de excavaciones de túneles, puede ser conveniente usar E_{ur} en vez de E_{50} .

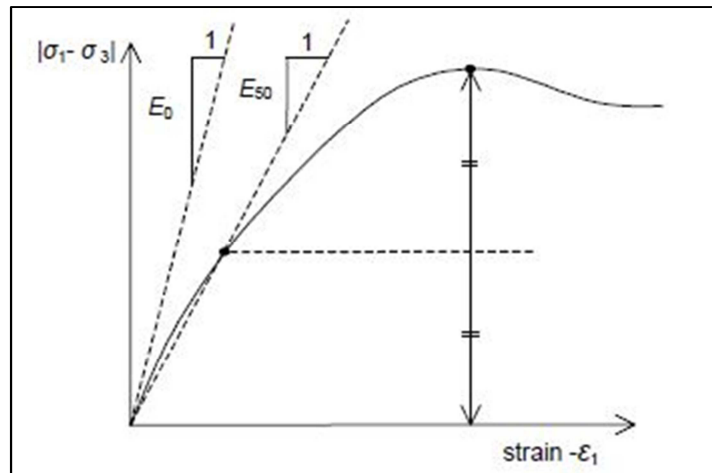


Figura 6. Definición de E_0 y E_{50} para resultados estándar de tests triaxiales drenados

Para suelos, ambos, módulos de descarga, E_{ur} , y el primer modulo de carga E_{50} , tienden a incrementarse con la presión de confinamiento. Además, las capas profundas de suelo tienden a tener una rigidez mejor que las capas de suelo superficiales. Además, la rigidez observada depende del camino tensional que es seguido o utilizado. La rigidez es mucho más alta para carga/descarga que para la carga primaria. También, la rigidez del suelo observada en términos de módulo de Young puede ser más baja por compresión (drenado) que por cizallamiento (tensión de corte). Por lo tanto, cuando usamos un módulo de rigidez constante para representar el comportamiento del suelo, se debería elegir un valor que fuera constante con el nivel y el camino desarrollado del esfuerzo aplicado. Nótese que parte de la dependencia tensional del comportamiento del suelo es tenida en cuenta en los modelos avanzados de PLAXIS, que se describen en los apartados posteriores.

4.3.3. 2. Coeficiente de Poisson (ν)

Los ensayos estándar triaxiales drenados pueden producir un significativo descenso en el ratio de volumen al principio de cargas axiales y consecuentemente un bajo valor inicial de coeficiente de Poisson (ν_0). Para algunos casos, como en particularmente problemas de descarga, puede ser realista usar tal valor inicial bajo, pero en general cuando usamos el modelo de Mohr-Coulomb, se recomienda un valor más alto que el descrito.

La selección del coeficiente de Poisson es particularmente simple cuando el modelo elástico o el modelo Mohr-Coulomb son usados para cargas gravitacionales (incremento $\Sigma Mweight$ de 0 a 1 en un cálculo plástico. Para este tipo de cargas, PLAXIS debería dar ratios realistas o creíbles de $K_0 = \sigma_h / \sigma_v$. Como ambos modelos darán un buen valor

de ratio $\sigma_h/\sigma_v = \nu/(1 - \nu)$ en compresión en 1D, es fácil seleccionar un buen coeficiente de Poisson que dé valores creíbles de K_0 . Por lo tanto, ν es evaluado relacionándolo con K_0 . En muchos casos, uno obtendrá ν entre el rango de 0.3 y 0.4. en general, estos valores pueden ser usados para otras condiciones de carga que no sean compresión en 1D. Para condiciones de descarga, sin embargo, es más común usar valores entre el rango 0.15 y 0.25.

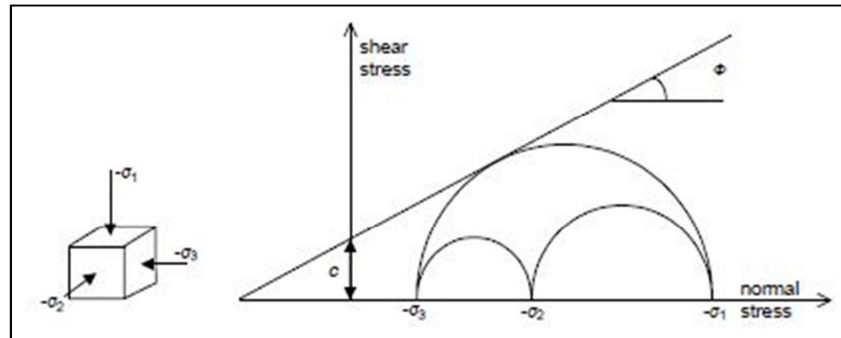


Figura 7. Círculos tensionales de la superficie de fluencia

4.3.3. 3. Cohesión (c)

La cohesión tiene unidades de tensión o esfuerzo. PLAXIS puede tratar arenas sin cohesión ($c=0$), pero a veces algunas opciones no desarrollan bien el problema. Para evitar complicaciones, es aconsejable usar un valor mínimo de 0.2 kPa.

4.3.3. 4. Ángulo de Fricción Interna (ϕ)

El ángulo de fricción interna, ϕ (phi), se introduce en grados sexagesimales. Ángulos de fricción interna altos, como a veces, ángulos obtenidos de arenas densas, incrementarán substancialmente los cálculos computacionales plásticos.

El tiempo computacional aumenta más o menos exponencialmente con el ángulo de fricción interna. Por lo tanto, altos valores del ángulo de fricción interna deberían ser evitados cuando se intenta simular preliminarmente cálculos para proyectos particulares, El ángulo de fricción interna determina la resistencia al corte, como se muestra en la figura 7.

4.3.3. 5. Ángulo de Dilatancia (ψ)

El ángulo de dilatancia (ψ), (psi), se especifica en grados sexagesimales. A parte de capas fuertemente consolidadas, los suelos arcillosos tienden a mostrar una dilatancia pequeña ($\psi \approx 0$). La dilatancia de las arenas depende de la densidad y del ángulo de

fricción interna. Para arenas quarcificadas, el orden de magnitud es $\psi \approx \varphi - 30^\circ$, sin embargo, en ángulo de dilatancia es principalmente 0. Un pequeño valor negativo para ψ es solo realmente posible para arenas extremadamente mal graduadas. Para más información sobre el enlace entre en ángulo de fricción interna y el ángulo de dilatancia, ver Bolton (1986) (R.M.P)

4.3.4 . Parámetros Avanzados del modelo Mohr-Coloumb

Cuando usamos el modelo de Mohr-Coulomb en PLAXIS, existe la opción de usar parámetros avanzados, tal y como se ve en la figura 8. En general se refiere a la variación de los parámetros del modelo con la profundidad.

Advanced parameters Mohr-Coulomb

Stiffness
 $E_{\text{increment}}$: 0.000 kN/m²/m
 y_{ref} : 0.000 m

Strength
 $C_{\text{increment}}$: 0.000 kN/m²/m
 y_{ref} : 0.000 m
☒ Tension cut off
Tensile strength : 0.000 kN/m²

Undrained behaviour
☒ Standard settings
☐ Manual settings
Skempton-B : 0.987
 v_u : 0.495
 $K_{w,\text{ref}} / n$: 1.229E+06 kN/m²

Consolidation
 $C_{v,\text{ref}}$: 2.880 m²/day

$$C_{v,\text{ref}} = \frac{k_y \cdot E_{\text{ced}}}{\gamma_w}$$

OK Cancel Default Help

Figura 8. Ventana de PLAXIS para la introducción de parámetros avanzados

4.4. Modelo Constitutivo Hardening Soil (Isotropic Hardening)

En contraposición con el modelo elástico-plástico perfecto, la superficie de fluencia para el modelo de endurecimiento del suelo (Hardening Soil) no está fija en un espacio de tensiones principales, sino que, puede expandirse debido a la plasticidad. Podemos hacer distinciones entre dos principales tipos de endurecimiento, endurecimiento de corte (shear hardening) y endurecimiento de compresión (compression hardening). El endurecimiento de corte es usado para modelizar esfuerzos debidos a cargas primarias desviadoras, El endurecimiento de compresión es usado para modelizar cargas plásticas irreversibles debido a la compresión primaria en cargas edométricas y cargas isotrópicas. Ambos modelos se contemplan en el modelo presente del modelo Hardening Soil.

El Modelo Hardening Soil es un modelo avanzado para simular el comportamiento de diferentes tipos de suelos, suelos blandos y suelos rígidos, Schanz (1998) (R.M.P). Cuando estamos sujetos a cargas primarias desviadoras, el suelo muestra una rigidez decreciente y simultáneamente un desarrollo de tensión plástica irreversible. En el caso en particular de un ensayo triaxial drenado, la relación observada entre el esfuerzo axial y el esfuerzo desviador puede ser bien aproximada por una hipérbola. Tal como la relación que fue primeramente formulada por Kondner (1963) (R.M.P) y más tarde usada en el bien conocido modelo hiperbólico (Duncan & Chang, 1970) (R.M.P). El modelo Hardening Soil, sin embargo, mejora significativamente el modelo hiperbólico por los motivos siguientes:

En primer lugar, usando la teoría de la plasticidad preferiblemente antes que la teoría de la elasticidad. En segundo lugar, incluyendo la dilatancia del suelo y en tercer lugar introduciendo una segunda superficie de fluencia en compresión (yield cap). Algunas características básicas del modelo son:

- Esfuerzo dependiente de la rigidez de acuerdo con leyes de fuerza (m)
- Deformación plástica debido a carga primaria desviadora (E_{50}^{ref})
- Deformación plástica debido a compresión primaria (E_{oed}^{ref})
- Carga/Descarga elástica (E_{ur}^{ref}, ν_{ur})
- Fallo de acuerdo al modelo de Mohr-Coloumb (c, φ y ψ)

Una etapa básica del presente modelo del Hardening Soil es la dependencia de la rigidez con el confinamiento del suelo. En condiciones edométricas de tensión-deformación, el modelo implica tener la relación $E_{oed} = E_{oed}^{ref} (\sigma/p^{ref})^m$. En el caso especial de suelos

blandos, es realista usar $m = 1$. en estas situaciones hay también una relación simple entre el índice de compresión modificado λ^* y el módulo de carga edométrica mencionado anteriormente.

$$E_{oed}^{ref} = \frac{E^{ref}}{\lambda^*} \quad \lambda^* = \frac{\lambda}{(1 + e_0)} \quad [4.31]$$

Donde p^{ref} es una tensión media de referencia. Aquí consideramos un módulo edométrico tangente en una presión de referencia particular p^{ref} . Por lo tanto, la rigidez de carga primaria se relaciona con el índice de compresión modificado λ^* . Se recuerda que λ es el índice de compresión del modelo Cam-Clay. Similarmente, el módulo de descarga-recarga se relaciona con el índice de hinchamiento modificado κ^* . Aquí se muestra la relación aproximada:

$$E_{ur}^{ref} = \frac{3p^{ref}(1 - 2\nu_{ur})}{\kappa^*} \quad \kappa^* = \frac{\kappa}{(1 + e_0)} \quad [4.32]$$

Otra vez, esta relación se aplica con una combinación del valor $m = 1$.

4.4.1. Relación hiperbólica para ensayo triaxial drenado estándar

Una idea básica para la formulación del modelo Hardening-Soil es la relación hiperbólica entre la deformación vertical ε_1 , y la tensión desviadora, q , en carga triaxial. En este caso, los test triaxiales estándar drenados tienden a curvas de fluencia que pueden ser descritas por:

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad \text{para } q < q_f \quad [4.33]$$

Donde q_a es el valor asintótico de la fuerza de cizallamiento. Esta relación se representa en la figura 9. El parámetro E_{50} es el módulo de rigidez para cargas primarias y es dado por la siguiente ecuación:

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi - p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad [4.34]$$

Donde E_{50}^{ref} es un modulo de rigidez de referencia correspondiéndose con la presión de confinamiento de referencia p^{ref} . en PLAXIS, se usa por defecto una presión de referencia $p^{ref} = 100$ (unidades de esfuerzo, comúnmente N/m^2). La actual rigidez depende del esfuerzo o tensión principal menor, σ'_3 , que es la presión de confinamiento en un ensayo triaxial. Nótese que σ'_3 es negativa para compresión. Para simular una dependencia tensional logarítmica, como es observada en arcillas blandas, m se toma con un valor de referencia igual a 1.0. Janbu (1963) (R.M.P) muestra valores de m

El esfuerzo desviador último q_f , y la cantidad q_a en la ecuación [4.33] son definidas como:

$$q_f = (c \cot \varphi - \sigma'_3) \frac{2 \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \quad y: q_a = \frac{q_f}{R_f} \quad [4.35]$$

Otra vez, se remarca que σ'_3 es normalmente negativo. La relación mostrada arriba para q_f se deriva del criterio de rotura de Mohr-Coloumb, lo que involucra los parámetros de c y φ . En el momento que $q = q_f$, el criterio de rotura se satisface y la fluencia plástica perfecta de la superficie de fluencia ocurre como se describe en el modelo de Mohr-Coulomb.

La relación entre q_f y q_a es dada por la relación de rotura R_f , que debería ser obviamente más pequeño que 1. En PLAXIS, $R_f = 0.9$ es escogido como un valor bastante adecuado por defecto.

Para casos tensionales de descarga-carga, se usa otro módulo de rigidez con dependencia tensional:

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi - p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad [4.36]$$

Donde E_{ur} es el módulo de Young de referencia para descarga-recarga, correspondiéndose así con la presión de referencia p^{ref} . En muchos casos prácticos es apropiado definir E_{ur}^{ref} como $3E_{50}^{ref}$, como es usado por defecto en PLAXIS.

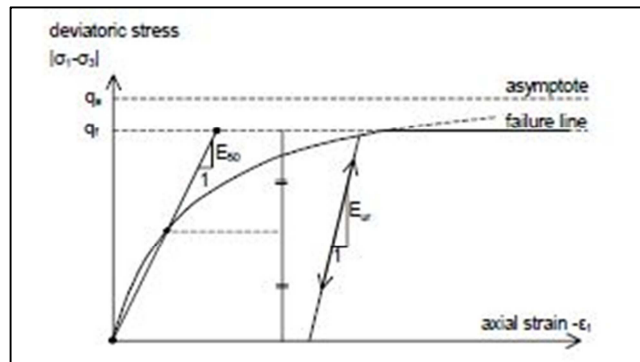


Figura 9. Relación hiperbólica tensión-deformación en carga primaria para un ensayo triaxial drenado estándar

4.4.2 Aproximación hiperbólica por el modelo Hardening-Soil

En esta sección será mostrado como este modelo nos da virtualmente la curva hiperbólica de tensión-deformación de la ecuación [4.33] cuando consideramos el esfuerzo producido a través de un ensayo triaxial drenado estándar. Pero antes, debemos considerar también las correspondientes deformaciones plásticas. Esta parte de la función de fluencia tienen forma como:

$$f = \bar{f}^p \quad [4.37]$$

Donde \bar{f} es una función de esfuerzo y p es una función de deformación plástica:

$$\bar{f} = \frac{1}{E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{2q}{E_{ur}} \quad ^p = -(2\varepsilon_1^p - \varepsilon_v^p) \approx -2\varepsilon_1^p \quad [4.38]$$

Con q , q_a y E_{ur} definidas como se ha mostrado desde la ecuación [4.34] hasta la [4.36], mientras que el superíndice p es usado para denotar deformaciones plásticas. Para suelos duros, el volumen plástico cambia (ε_v^p) tendiendo a ser relativamente pequeño y eso conduce a la aproximación de $^p \approx -2\varepsilon_1^p$. Más adelante nos referiremos a la definición del parámetro de endurecimiento p .

Una etapa esencial de las definiciones de arriba mencionadas para \bar{f} es que se relaciona con la bien conocida ley hiperbólica [4.33]. Para comprobar este estado, hay que considerar carga noval o primaria, lo que implica la condición de fluencia $f = 0$. Para carga primaria, en consecuencia hay fluencia $^p = \bar{f}$ y esto nos lleva desde la ecuación [4.38] a:

$$-\varepsilon_1^p \approx \frac{1}{2}\bar{f} = \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} - \frac{q}{E_{ur}} \quad [4.39]$$

Además de las deformaciones plásticas, el modelo considera deformaciones elásticas. Las deformaciones plásticas se desarrollan en carga noval solamente, pero las tensiones elásticas se desarrollan en ambas, carga primaria y en descarga/carga. Para ensayos triaxiales drenados definiendo $\sigma'_2 = \sigma'_3 = \text{constante}$, el modulo elástico E_{ur} se mantiene constante y las deformaciones elásticas vienen dadas por las ecuaciones:

$$\varepsilon_1^e = \frac{q}{E_{ur}} \quad -\varepsilon_2^e = -\varepsilon_3^e = -\nu_{ur} \frac{q}{E_{ur}} \quad [4.40]$$

Donde ν_{ur} es el coeficiente de Poisson de descarga/carga. Aquí, debemos darnos cuenta que la restricción se hace para deformaciones que se desarrollan durante cargas desviadoras, mientras que, las deformaciones que se desarrollan durante la primera fase nada más empezar los ensayos no son tenidas en cuenta. Para la primera fase de compresión isótropa (con consolidación), el modelo Hardening-Soil predice cambios de

volumen completamente elásticos de acuerdo con la ley de Hooke, pero, estas deformaciones no están incluidas en la ecuación [4.40].

En el caso de la carga desviadora en el ensayo triaxial, la deformación axial es el sumatorio de los componentes elásticos dados en la ecuación [4.40] y los componentes plásticos teniendo en cuenta la ecuación [4.39], por lo tanto tenemos que:

$$-\varepsilon_1 = -\varepsilon_1^e - \varepsilon_1^p \cong \frac{1}{2E_{50}} \frac{q}{1 - q/q_a} \quad [4.41]$$

Esta relación permanece exactamente en ausencia de deformaciones plásticas volumétricas, p.e. cuando $\varepsilon_v^p = 0$.

En realidad, las deformaciones plásticas volumétricas nunca serán exactamente igual a 0, pero para suelos duros, el volumen plástico cambia tendiendo a ser más pequeño comparándolo con la deformación axial, por eso, la aproximación hecha en la ecuación [4.41] será generalmente precisa. Queda por lo tanto claro que el modelo Hardening-Soil modela una curva de fluencia hiperbólica bajo las condiciones de un ensayo triaxial.

Para un valor constante dado del parámetro de endurecimiento, $\bar{\varepsilon}^p$, la condición de fluencia $f = 0$, puede visualizarse en el plano $p' - q$. Cuando se grafica esta fluencia, se tiene que usar la ecuación [4.38], así como las ecuaciones [4.34] y [4.36] para E_{50} y E_{ur} respectivamente. Debido a las últimas expresiones, la forma de la superficie fluencia en el plano depende del exponente m . Para $m = 1$, podemos observar líneas rectas, así como se puede observar ligeramente un curvado en la línea de fluencia en el plano cuando el valor de m es menor a 1. La figura 10 nos muestra la forma sucesiva de la recta de fluencia en el plano para $m = 0.5$, siendo típicamente para suelos duros.

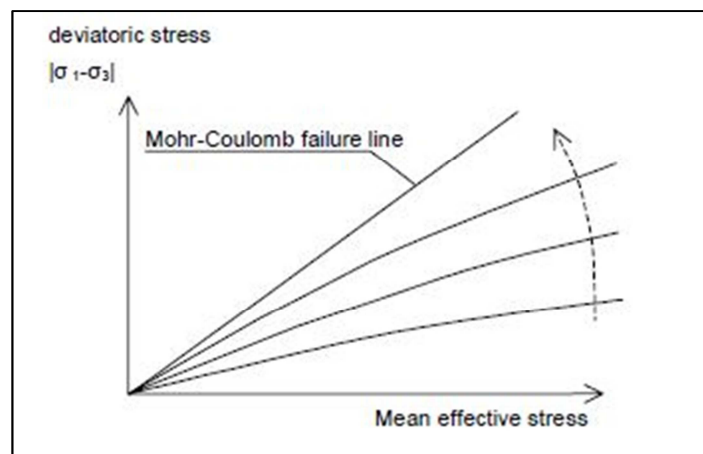


Figura 10. Movimiento sucesivo de la línea de rotura de Mohr-Coulomb dependiendo de varios valores constantes del valor de endurecimiento $\bar{\varepsilon}^p$

4.4.3. Deformación volumétrica plástica para esfuerzos en estados triaxiales

Habiendo presentado la relación para la deformación de corte plástica, γ^p , nos debemos fijar en la deformación volumétrica plástica, ε_v^p . Como para todos los modelos plásticos, el Hardening-Soil tiene una relación entre ratios de deformación plástica, p.e. la relación entre ε_v^p y γ^p . Esta regla de flujo tiene la forma lineal:

$$\varepsilon_v^p = \sin\psi_m \cdot \gamma^p \quad [4.42]$$

Claramente, necesitamos algún detalle más para especificar la movilidad del ángulo de dilatancia ψ_m , para el presente modelo, se adopta la expresión:

$$\sin\psi_m = \frac{\sin\varphi_m - \sin\varphi_{cv}}{1 - \sin\varphi_m \sin\varphi_{cv}} \quad [4.43]$$

Donde ψ_{cv} es el estado crítico del ángulo de fricción en estado crítico a volumen constante independiente de la densidad, y φ_m es el ángulo de fricción movilizado:

$$\sin\varphi_m = \frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{\sigma'_1 + \sigma'_3 - 2c \cot\varphi} \quad [4.44]$$

La ecuación de arriba corresponde a la bien conocida teoría de la tensión-dilatancia por Rowe (1962) (R.M.P), como se ha explicado por Schanz & Vermeer (1995) (R.M.P). La propiedad esencial de la teoría esfuerzo-dilatancia es que el material se contrae para ratios de esfuerzos pequeños ($\varphi_m > \varphi_{cv}$). En rotura, cuando el ángulo de fricción movilizado iguala en valor al ángulo de rotura φ , encontramos en la ecuación [4.43] que:

$$\sin\psi = \frac{\sin\varphi - \sin\varphi_{cv}}{1 - \sin\varphi \sin\varphi_{cv}} \quad [4.45]$$

O equivalentemente:

$$\sin\varphi_{cv} = \frac{\sin\varphi - \sin\psi}{1 - \sin\varphi \sin\psi} \quad [4.46]$$

Por lo tanto, el estado crítico del ángulo, puede ser extraído y tenido en cuenta desde ángulos de rotura como φ y ψ . PLAXIS realiza el cálculo automáticamente, así que los usuarios no necesitan especificar un valor concreto de φ_{cv} .

En vez de eso, el usuario tiene que proveer al programa del valor último o de rotura del ángulo de fricción interna y del ángulo de dilatancia, ψ .

4.4.4. Parámetros del modelo Hardening Soil

Algunos parámetros del modelo Hardening Soil, coinciden con aquellos del modelo clásico de Mohr-Coulomb. Los parámetros son los que se observan en la pantalla de PLAXIS (figura 11) y que se describen a continuación.

Figura 11. Parámetros básicos del modelo Hardening Soil

Parámetros de rotura como en el modelo Mohr-Coulomb:

c : Cohesión (efectiva) [kN/m²]
 ϕ : Ángulo de fricción interna [°]
 Ψ : Ángulo de dilatación [°]

Parámetros básicos para la rigidez del suelo:

E_{50}^{ref} : Rigidez secante en un test triaxial drenado estándar [kN/m²]
 E_{oed}^{ref} : Rigidez tangente para carga edométrica primaria o noval [kN/m²]
 m : Exponente para la dependencia tensión - rigidez [-]

Parámetros avanzados (se aconseja usar el valor por defecto):

E_{ur}^{ref} : Rigidez de Descarga/Carga (por defecto $E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref}$) [kN/m²]
 ν_{ur} : Coeficiente de Poisson para descarga-carga (por defecto $\nu_{ur}=0.2$) [-]
 p^{ref} : Presión de referencia para rigideces (por defecto $p^{ref} = 100$ unidades de presión) [-]
 K_0^{nc} : K_0 – valor para coeficiente de empuje al reposo (por defecto $K_0^{nc} = 1 - \sin\phi$)

- R_f : Relación de rotura q_r/q_a (por defecto $R_f = 0.9$) (ver figura 1-7) [-]
- $\sigma_{tension}$: Resistencia a la tracción (por defecto $\sigma_{tension} = 0$) [kN/m²]
- $c_{increment}$: como en el modelo Mohr-Coulomb (por defecto $c_{increment} = 0$) [kN/m²]

Módulo de Rigidez E_{50}^{ref} & E_{oed}^{ref} y parámetro m

La ventaja del modelo Hardening-Soil sobre el modelo de Mohr-Coulomb no es solo el uso de la curva hiperbólica tensión-deformación en vez de una curva bi-lineal, sino que también el control de la dependencia de la tensión. Cuando usamos el modelo Mohr-Coulomb, el usuario tiene que seleccionar un valor fijado para el módulo de Young mientras que para suelos reales esta rigidez depende del estado tensional. Es por lo tanto necesario, estimar el nivel tensional dentro del suelo y usar esto, para obtener valores adecuados para la rigidez. Con el modelo de Hardening-Soil, sin embargo, la incómoda selección de insertar los parámetros no es necesaria. En vez de eso, el módulo de rigidez E_{50}^{ref} es definido por un esfuerzo principal de referencia menor $-\sigma'_3 = p^{ref}$ como valor por defecto, el programa usa $p^{ref} = 100$ unidades de tensión.

Alternativamente a los parámetros E y ν , pueden entrarse los parámetros K y G (modulo de rigidez volumétrica y de corte). Dentro de la teoría de la elasticidad de Hooke, la conversión entre E y G es $E = 2(1 + \nu)G$. Así como E_{ur} es una rigidez elástica real, se puede en consecuencia escribir $E = 2(1 + \nu)G_{ur}$, donde G_{ur} es un modulo de corte elástico. En descarga, nótese que PLAXIS permite la entrada de E_{ur} y ν_{ur} pero no la entrada directa de G_{ur} . En contraposición con E_{ur} , el módulo secante E_{50} no es usado en elasticidad. Como consecuencia, no hay una conversión simple de E_{50} a G_{50} .

En contraposición de los modelos basados en la elasticidad, el modelo elastoplástico Hardening-Soil, no involucra una relación fija entre la rigidez triaxial (drenada) E_{50} y la rigidez edométrica E_{oed} para una compresión uni-dimensional (1D). Las rigideces en este caso pueden introducirse independientemente.

Habiendo definido E_{50} en la ecuación [4.34], es importante definir la rigidez edométrica. Aquí, se usa la ecuación:

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c \cos \varphi - \sigma'_3 \sin \varphi}{c \cos \varphi - p^{ref} \sin \varphi} \right)^m \quad [4.47]$$

Donde E_{oed} es el modulo de rigidez tangente como se indica en la siguiente figura 12. Por lo tanto, E_{oed}^{ref} es una rigidez tangencial en la tensión vertical $-\sigma'_1 = p^{ref}$. Nótese que usamos σ_1 preferiblemente antes que σ_3 , lo que consideramos carga primaria.

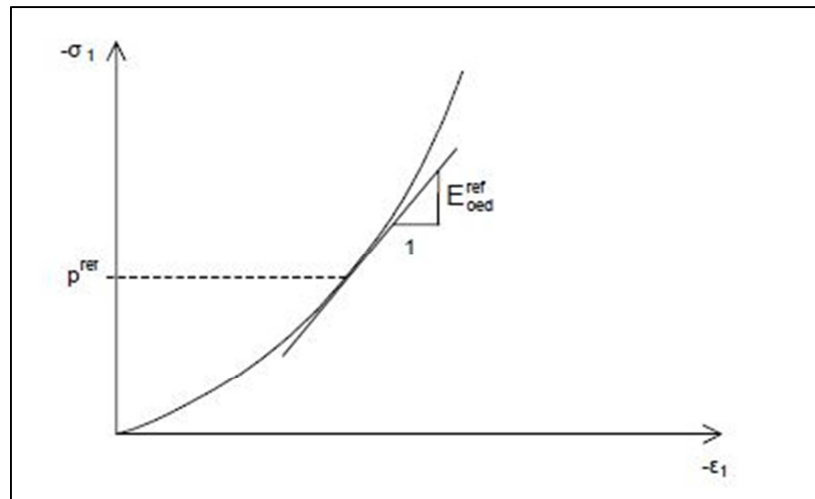


Figura 12. Definición de E_{oed}^{ref} en resultados de test edométrico

Parámetros Avanzados

Valores realistas para ν_{ur} están alrededor de 0.2, y este valor es el usado por PLAXIS por defecto, como se muestra en la figura 13.

Figura 13. Parámetros avanzados del modelo Hardening Soil

En contraste con el modelo de Mohr-Coulomb, K_0^{nc} no es simplemente una función del coeficiente de Poisson, pero es un parámetro a introducir apropiado. Como configuración por defecto, PLAXIS usa la correlación $K_0^{nc} = 1 - \sin\phi$. Se sugiere mantener el valor dado por la formula presentada ya que la correlación es altamente realista. Sin embargo, los usuarios tienen la posibilidad de seleccionar diferentes valores. Dependiendo de otros parámetros, tales como E_{50} , E_{oed} y ν_{ur} , suele pasar que hay un cierto rango válido para valores de K_0^{nc} . Los valores de K_0^{nc} fuera de ese rango son rechazados por PLAXIS. En las ventanas de inserción de parámetros, el programa muestra el posible valor más cercano que será usado en los cálculos posteriores.

Dilatancia Límite

Después de un extenso corte o cizalla, la dilatación de los materiales llega en un estado de densidad crítica donde la dilatancia ha llegado a un final, como se indica en la figura 14. Esto puede ser incluido en el modelo Hardening Soil a través de un corte de la dilatancia. Para especificar este comportamiento, el valor de índice de poros inicial (e_{init}) y el índice de poros máximo (e_{max}) del material deben ser introducidos como parámetros generales. En el momento en que el volumen cambie resultados en un estado de máximo vacío, el ángulo de dilatancia movilizado, ψ_{mov} es automáticamente definido de vuelta con valor 0, como podemos ver indicado en la figura 14.

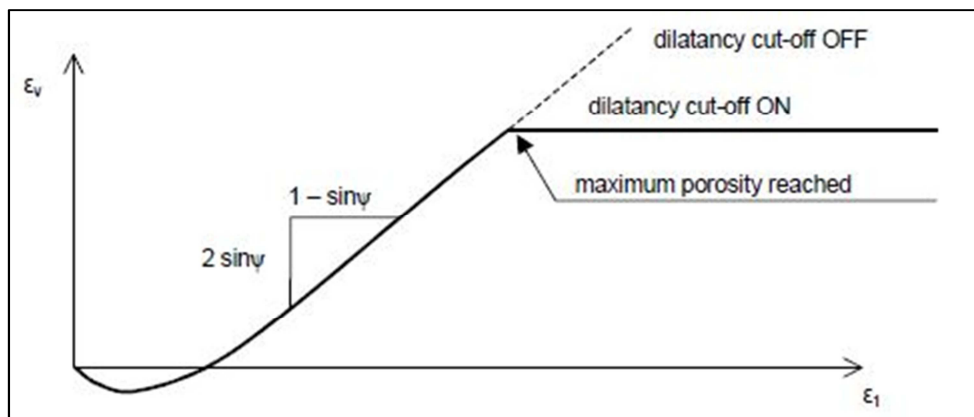


Figura 14. Curva de deformación volumétrica (eje vertical) respecto a la deformación vertical (eje horizontal) resultante para un test triaxial estándar drenado.

$$\text{Para: } e < e_{max} : \quad \sin\psi_{mov} = \frac{\sin\phi - \sin\phi_{cv}}{1 - \sin\phi \sin\phi_{cv}} \quad [4.48]$$

Dónde:

$$\sin\varphi_{cv} = \frac{\sin\varphi - \sin\psi}{1 - \sin\varphi \sin\psi} \quad [4.49]$$

Para: $e \geq e_{max} :$ $\psi_{mov} = 0 \quad [4.50]$

El índice de poros está relacionado con la deformación volumétrica, ε_v , a partir de la relación:

$$-(\varepsilon_v - \varepsilon_v^{init}) = \ln\left(\frac{1+e}{1+e_{init}}\right) \quad [4.51]$$

Donde un incremento de ε_v es positivo por dilatación. El índice de poros inicial, e_{init} , es el índice de poros in situ del suelo. El índice de poros máximo es el índice de poros del material en estado de crítico. Tan pronto como se alcanza el índice de poros máximo, el ángulo de dilatación se define como 0. El índice de poros mínimo, e_{min} , de un suelo puede también introducirse, pero este parámetro general del suelo no es usado dentro del contexto del modelo del Hardening-Soil.

Nótese que la selección de la dilatación máxima o límite y de la entrada del índice de poros está hecha en la tabla “general” de configuración de características del material y no en la tabla “parámetros”. La selección del de la dilatación límite está solamente disponible cuando el modelo Hardening-Soil ha sido el seleccionado para resolver el problema. Por defecto, la dilatación límite no está activa.

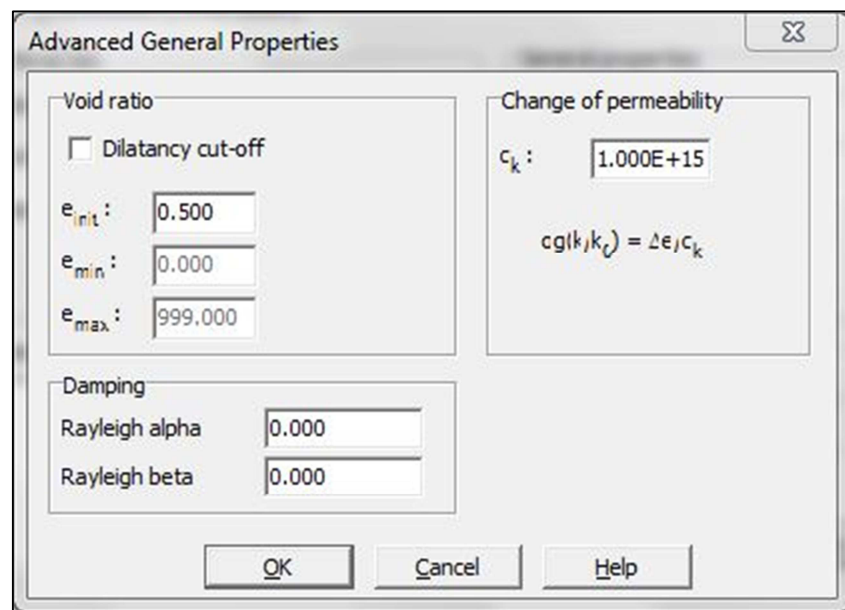


Figura 15. Ventana de las propiedades avanzadas generales

Cierre de la superficie de fluencia en el modelo Hardening-Soil

La Superficie de fluencia de corte como la mostrada en la figura 16 no explica la deformación volumétrica plástica que es medida en compresión isotrópica. Una segunda superficie de fluencia debe, por lo tanto, ser introducida para cerrar la región elástica en la dirección del eje p . Sin esa culminación/cierre de la superficie de fluencia no sería posible formular el modelo con independencia de entradas para E_{50}^{ref} y E_{oed}^{ref} . El módulo triaxial, ampliamente controla la superficie de fluencia de corte y el módulo edométrico, controla el cierre de la superficie de fluencia. De hecho, E_{50}^{ref} ampliamente controla la magnitud de las deformaciones plásticas en el cierre de la superficie. Similarmente, E_{oed}^{ref} es usado para controlar la magnitud de las deformaciones plásticas. En esta sección el cierre de la superficie de fluencia será descrita en detalle. Para el final de la superficie de fluencia (punto más alto/culminación) consideramos:

$$f^c = \frac{\tilde{q}^2}{\alpha^2} + p^2 - p_p^2 \quad [4.52]$$

Dónde α es un parámetro auxiliar del que se relaciona con K_0^{nc} como veremos más adelante. Además, tenemos que $p = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ y $\tilde{q} = \sigma_1 + (\delta - 1)\sigma_2 - \delta\sigma_3$ con $\delta = (3 + \sin\varphi)/(3 - \sin\varphi)$. \tilde{q} es una medida de tensión para tensiones desviadoras/es. En el caso especial de compresión triaxial ($-(\sigma_1 > -\sigma_2 = -\sigma_3)$) tenemos que $\tilde{q} = -(\sigma_1 - \sigma_3)$ y para extensiones triaxiales ($-\sigma_1 = -\sigma_2 > -\sigma_3$), \tilde{q} se reduce a $\tilde{q} = -\delta(\sigma_1 - \sigma_3)$. La magnitud del punto más alto de la superficie de fluencia es determinada por la presión de pre-consolidación isotrópica p_p . Hay una ley de endurecimiento que relaciona p_p con la deformación volumétrica de la cumbre de la superficie ε_v^{pc} :

$$\varepsilon_v^{pc} = \frac{\beta}{1 - m} \left(\frac{p_p}{p^{ref}} \right)^{1-m} \quad [4.53]$$

La deformación volumétrica en la parte superior, es la deformación volumétrica en compresión isotrópica. Además de las constantes conocidas m y p^{ref} hay otra constante modelo β . Ambas α y β son parámetros de la superficie de fluencia, pero no se usan como entradas directas en el programa. En vez de tener entradas directas, hay relaciones de la forma:

$$\alpha \leftrightarrow K_0^{nc} \quad (\text{default: } K_0^{nc} = 1 - \sin\varphi) \quad [4.54]$$

$$\beta \leftrightarrow E_{oed}^{ref} \quad (\text{default: } E_{oed}^{ref} = E_{50}^{ref}) \quad [4.55]$$

Así, K_0^{nc} y E_{oed}^{ref} pueden ser usados como parámetros de entrada que determinan la magnitud de α y β respectivamente. Para entender la forma que toma la parte superior de la superficie de fluencia, se debería ver primeramente que es una elipse en el plano $p - \tilde{q}$, como se indica en la figura 16.

La elipse tiene una longitud igual a p_p en el eje p , y αp_p en el eje \tilde{q} . Por lo tanto, p_p , determina la magnitud y α su relación de aspecto. Altos valores de α llevan a tener un escarpado en la parte superior de la superficie de fluencia por debajo de la línea de rotura de Mohr-Coulomb, mientras que valores pequeños de α , definen superficies mucho más puntiagudas alrededor del eje p . La elipse es usada en ambos, como una superficie de fluencia y como un potencial plástico, por lo tanto:

$$\varepsilon_v^{pc} = \lambda \frac{\partial f^c}{\partial \underline{\sigma}} \quad \text{con:} \quad \lambda = \frac{\beta}{2p} \left(\frac{p_p}{p^{ref}} \right)^m \frac{p_p}{p^{ref}} \quad [4.56]$$

Esta expresión para λ deriva de la condición de fluencia $f^c = 0$ y la ecuación [4.47] por p_p . Los inputs iniciales de valores p_p son provistos por PLAXIS a través del procedimiento inicial de creación de tensión a la hora de calcular. Aquí, p_p , es de una manera u otra, calculada a partir del valor introducido del grado de sobreconsolidación (OCR) o de la presión de pre-carga (POP) (ver sección 2.6 del Manual de PLAXIS). Para entender las superficies de fluencia en completo detalle, uno debería considerar las figuras que se presentan a continuación (figuras 16 y 17):

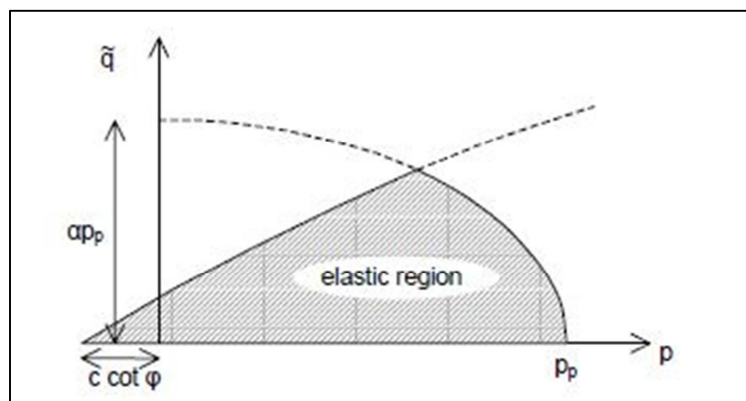


Figura 16. Superficie de fluencia en el plano $p-q$ (2D)

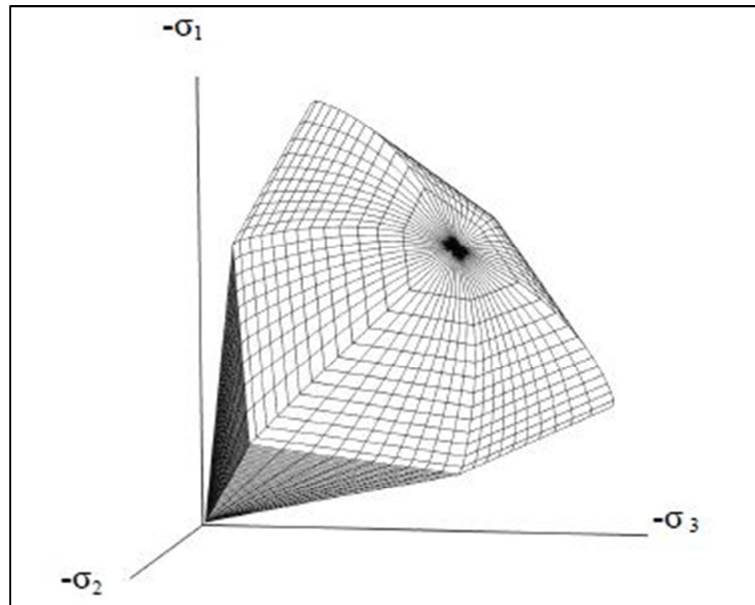


Figura 17. Representación de toda la superficie de fluencia del modelo Hardening-Soil en tensiones principales para suelo con poca cohesión

La figura 16 nos muestra simples líneas de fluencia en el plano p - \tilde{q} , mientras que la figura 17 representa las diferentes superficies de fluencia en el espacio de tensiones principales. Tienen la forma clásica hexagonal del criterio de rotura de Mohr-Coulomb. De hecho, la zona de fluencia o corte puede expandirse hasta la última superficie de rotura del criterio de Mohr-Coulomb. La parte de arriba de la superficie se expande en función de la tensión de pre-consolidación p_p .

5. Descripción del caso Base.

En este trabajo se ha estudiado la sensibilidad de algunos parámetros geotécnicos a variables que habitualmente se miden durante la construcción de un túnel mediante el software PLAXIS. En concreto se ha estudiado la sensibilidad de los desplazamientos a cambios en:

- Coeficiente de empuje al reposo (K_0)
- Cohesión (c)
- Ángulo de fricción interna (ϕ)
- Modulo elástico (E_{50})
- Módulo de Descarga-Recarga (E_{ur})

También se ha estudiado la sensibilidad de la Presión de agua (P_w) ya que es uno de los factores importantes en las primeras etapas de excavación de túneles sobretodo en condiciones no drenadas. El caso base que se ha diseñado para el estudio de éstas sensibilidades, es un túnel circular (simulando una excavación con máquina tuneladora) de 10m de diámetro a 10m de profundidad respecto la superficie. Se definió con estas dimensiones y con éstas profundidades para hacer un estudio realista respecto a las dimensiones de una tuneladora y para que las sensibilidades de los parámetros fueran notables en el cálculo posterior, ya que si el túnel hubiera estado a más profundidad, las sensibilidades de los parámetros así como los movimientos en superficie hubieran sido menores, dificultando de esta manera, obtener una zona notablemente sensible para medir en campo. En la figura 18 se muestra el caso base diseñado para este estudio:

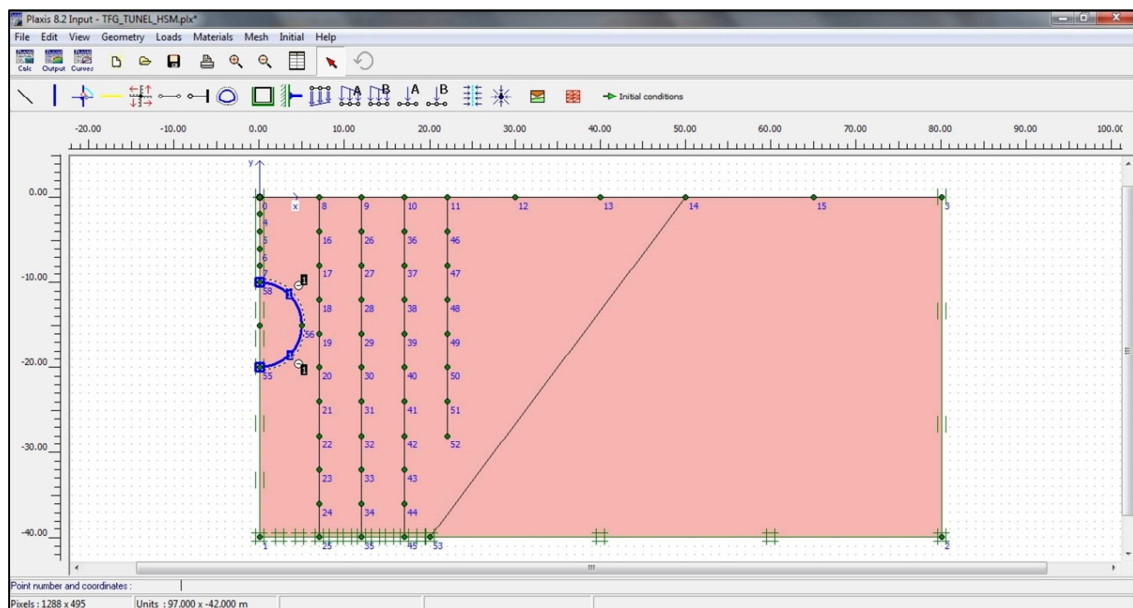


Figura 18. Geometría diseñada para los cálculos de sensibilidades

Como se puede ver en la Figura 18, se han creado algunos puntos a conciencia cerca de la envolvente del túnel para poder extraer información de movimientos tanto horizontales como verticales del terreno causados por la excavación de éste. Como el caso estudiado obedece a reglas de simetría, dada la geometría escogida, el cálculo con PLAXIS se ha realizado sólo con la parte derecha del túnel, cosa que facilita el cálculo. En la figura 19 que se muestra a continuación podemos ver la malla de Elementos Finitos que se ha creado para realizar el estudio de sensibilidades:

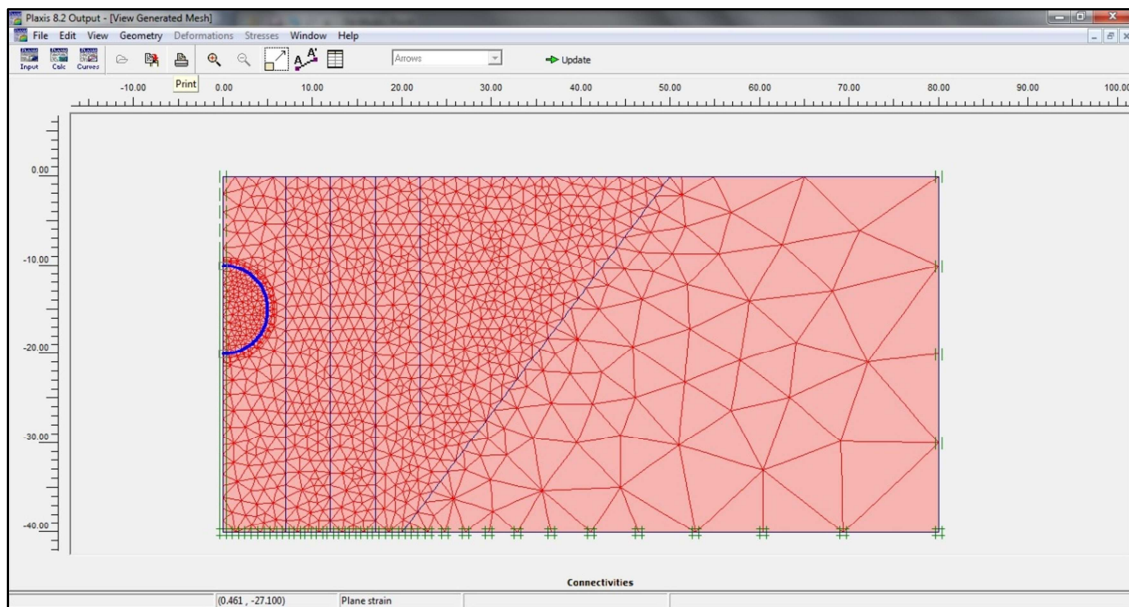


Figura 19. Malla de elementos finitos creada para la simulación de la construcción del túnel

Como se puede apreciar en la Figura 19, hay una parte de la geometría con una malla mucho más densa, con más nodos, puesto que necesitamos de la mayor precisión posible cerca de la envolvente del túnel para minimizar errores. La parte de la derecha de la geometría no presenta movimientos importantes a la hora de la excavación, por lo que se le atribuyó una malla menos densa, sin tanto detalle para agilizar también el cálculo. En total la malla de elementos finitos queda definida por 17444 nodos.

La litología con la que se ha llevado a cabo éste estudio ha sido una arcilla no drenada ya que para el estudio de la sensibilidad de la Presión de Agua (P_w) necesitamos de un material que no drene el agua durante la excavación.

En nuestro caso se adopta un modelo del tipo “Hardening Soil” con los parámetros indicados en las tablas 1 y 2.

Parámetros	Descripción	valor del parámetro	unidades
Y_{unsat}	Unsaturated specific weight	19	KN/m ²
Y_{sat}	Saturated specific weight	21	KN/m ²
K_x	Horizontal Permeability	8.64E-04	m/day
K_y	Vertical Permeability	8.64E-04	m/day
E_{50}	Secant stiffness in standard drained triaxial test	25000	KN/m ²
E_{oed}	Tangent stiffness for primary oedometer loading	20000	KN/m ²
E_{ur}	Unloading/Reloading stiffness ($20E_{50} \geq E_{ur} \geq 3E_{50}$)	75000	KN/m ²
η	Powe for stress-level dependency of stiffness	1	-
c	Effective Cohesion	10	KN/m ²
ϕ	Effective angle of internal friction	28	deg
ψ	Angle of dilatancy	0	deg
ν_{ur}	Poisson's ratio for unloading-reloading (by default $\nu_{ur}=0.2$)	0.2	-
p_{ref}	Reference stress for stiffness	100	KN/m ²
K_o	Coefficient of lateral earth pressure associated with normally	0.531	-
R_f	Failure ratio q_f/q_a	0.9	-
σ	Tensile strength	0	KN/m ²
$C_{incrmnt}$	Increase of cohesion per unit of depth	0	KN/m ²
R_{inter}	Interface strength factor	0.64	-

Tabla 1. Valores iniciales (por defecto) de los diferentes parámetros del modelo Hardening Soil

Parámetros	Descripción	valor del parámetro	unidades
Material			
Type	Constitutive Model	-	elastic
EA	Axial Stiffness	1.25E+07	KN/m
EI	Flexural Rigidity	2.60E+05	KNm ² /m
d_{eq}	Equivalent thickness	5.00E-01	m
w	Weight	12.5	KN/m ²
ν	Poisson's ratio	2.00E-01	-

Tabla 2. Valores iniciales (por defecto) de los diferentes parámetros del revestimiento del túnel

En los siguientes puntos del trabajo, se verá cuáles han sido los valores escogidos para estudiar la sensibilidad de cada uno de los parámetros.

5.1. Procedimiento constructivo del túnel en PLAXIS

El procedimiento constructivo de la excavación del túnel en PLAXIS consta de 4 fases:

- Fase inicial o fase 0
- Fase 1: simulación de la excavación del túnel con tuneladora
- Fase 2: inserción de las dovelas (revestimiento) después de la excavación
- Fase 3: Consolidación del terreno (365 días)

A continuación se procede a explicar cuáles son las características de cada una de las fases que se han utilizado para la simulación de la excavación del túnel.

5.1.1. Fase inicial o fase 0

En la fase 0 se definen las tensiones iniciales del terreno mediante el coeficiente de empuje al reposo (K_0), que es el procedimiento estándar que se usa en PLAXIS. El material se consideró inicialmente Normalmente Consolidado (NC) así que el valor de K_0 se define con la ecuación de Jaky (1944):

$$K_0 = 1 - \sin\phi \quad [5.1]$$

También se genera la presión de poros inicial, es decir, en nuestro caso, inicialmente se hace un cálculo de la presión de agua en toda la geometría regida por la ley hidrostática $\gamma_w \cdot z$, con lo que a más profundidad, más presión de agua imponiendo el nivel freático en superficie.

En la figura 20 se muestra la geometría de PLAXIS con todos los elementos posteriores desactivados que se muestran de color gris claro, hecho que indica que dichos elementos no están actuando todavía en el cálculo de la fase 0.

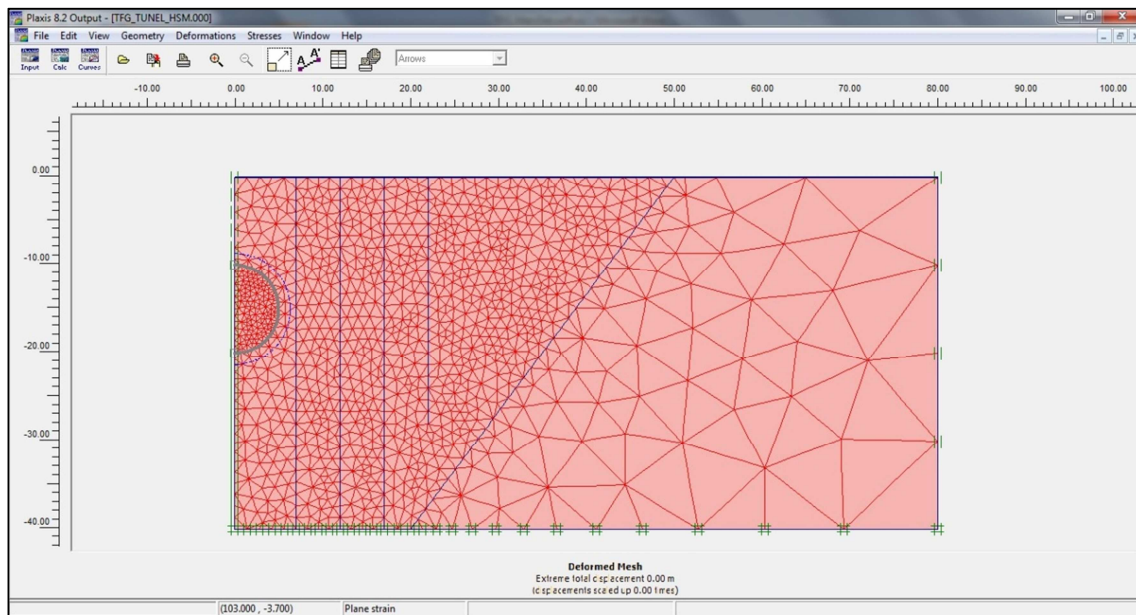


Figura 20 . Aspecto de la geometría en la fase 0 del proceso de cálculo

5.1.1. Fase 1: Simulación de la excavación de túnel con tuneladora

En la fase 1, se simula la excavación del túnel. En este caso, en el menú de PLAXIS, una vez definidos los esfuerzos iniciales y la presión de poros inicial, se procede a desactivar la parte del túnel que va a ser excavada, es decir, la zona interior del revestimiento del túnel. En ésta fase, hay que tener en cuenta dos cosas importantes:

1. desactivar la zona excavada sin activar/desactivar ningún elemento más de la geometría, ya que lo único que se realiza en la fase1 es la excavación.
2. es muy importante tener en cuenta que el hecho de haber excavado material, producirá unas deformaciones (todavía no le hemos colocado el revestimiento) que se tienen que tener en cuenta.

El hecho de no poder utilizar una herramienta de PLAXIS 3D, nos delimita en el sentido de no poder configurar todo un conjunto de variables que intervienen en el momento de la excavación como la velocidad de excavación de la tuneladora, la

frecuencia, velocidad, cantidad y presión de la inyectada durante el proceso constructivo para minimizar los asientos en superficie producidos por la construcción del túnel, etc. La versión V8 de PLAXIS 2D con la que se ha trabajado, nos permite simular de manera sencilla éste hecho de la deformación del terreno a causa de la excavación, introduciendo un valor que en PLAXIS se define como $\sum Mstage$.

La excavación del túnel se simula aplicando sobre el contorno excavado unas tensiones iguales y de sentido contrario a las iniciales. El valor de $\sum Mstage$ indica en porcentaje de tensión aplicada sobre el contorno excavado. El valor de $\sum Mstage$ esta entre 0 y 1. En este trabajo se ha estudiado el caso de sensibilidad tanto cerca de rotura como lejos de rotura, aunque en la mayor parte de resultados nos centraremos más en el caso cerca de rotura ya que es el caso dónde más sensibilidad conseguimos en los cálculos y mejor se ejemplifican los resultados.

En nuestro caso se han utilizado en particular los siguientes valores de $\sum Mstage$ para cerca y lejos de rotura:

- CERCA DE ROTURA (CC): $\sum Mstage = 0.28$
- LEJOS DE ROTURA (LC): $\sum Mstage = 0.25$

Se remarca que valores más próximos a 0.3 en $\sum Mstage$ implican una mayor deformación del terreno y por tanto tener más posibilidad de rotura, así como valores más cercanos a 0 significa menos posibilidades de rotura ya que no dejamos relajar tanto el terreno. En la figura 21, extraída del manual de PLAXIS, se muestra una explicación visual de la definición de $\sum Mstage$ así como el aspecto de la geometría en la Fase 1 de la simulación de la excavación y en la figuras 23 y 24 se muestra la ventana de PLAXIS con las fases de cálculo y la geometría del túnel excavado respectivamente.

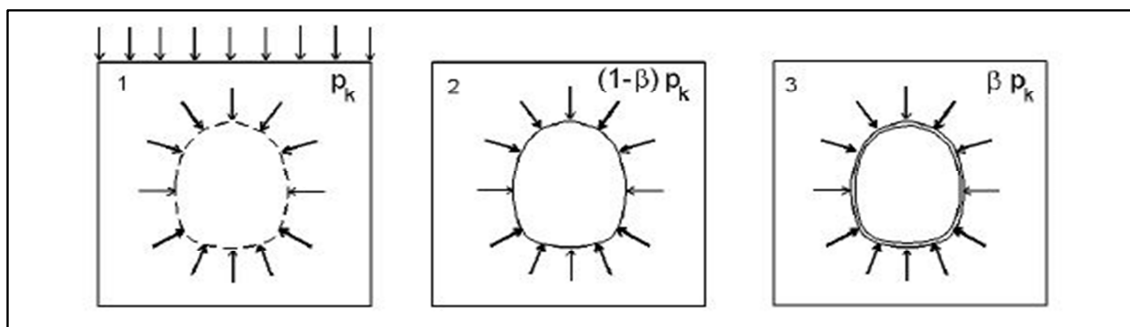


Figura 21. Aplicación del $\sum Mstage$ en PLAXIS

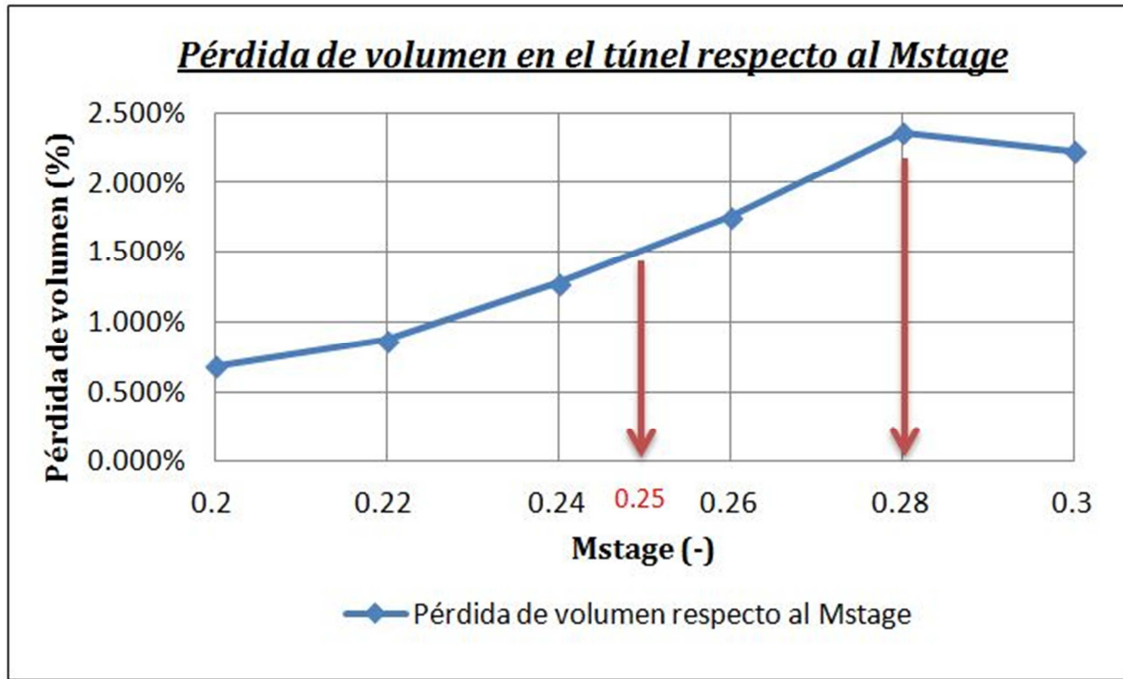


Figura 22. Comparación de la pérdida de volumen con el $\Sigma Mstage$ escogido.

Como se ha indicado antes, hay una relación directa entre el valor de $\Sigma Mstage$ y la pérdida de volumen generada por el túnel (que está relacionada con el volumen de asientos en superficie). En la figura 22 podemos observar cuales son las diferencias entre la pérdida de volumen en el túnel dependiendo del $\Sigma Mstage$ escogido.

En nuestro caso, como se ha comentado, 0.25 es un buen valor para el caso lejos de rotura ya que como vemos en la figura 22 hay bastante diferencia en cuanto a pérdida de volumen entre el valor de 0.28 (cerca de rotura) y el valor de lejos de rotura. La diferencia es de casi un 1% en pérdida de volumen entre estos dos mientras que comparando el valor de 0.25 con un valor más lejano aún de colapso como es el valor de $\Sigma Mstage = 0.2$ vemos que la diferencia entre estos dos últimos valores es de menos de un 1% (0.75% aproximadamente).

Por lo tanto consideramos que nuestros valores son suficientemente representativos para realizar el estudio de sensibilidad de movimientos y presión de agua respecto a los parámetros de interés.

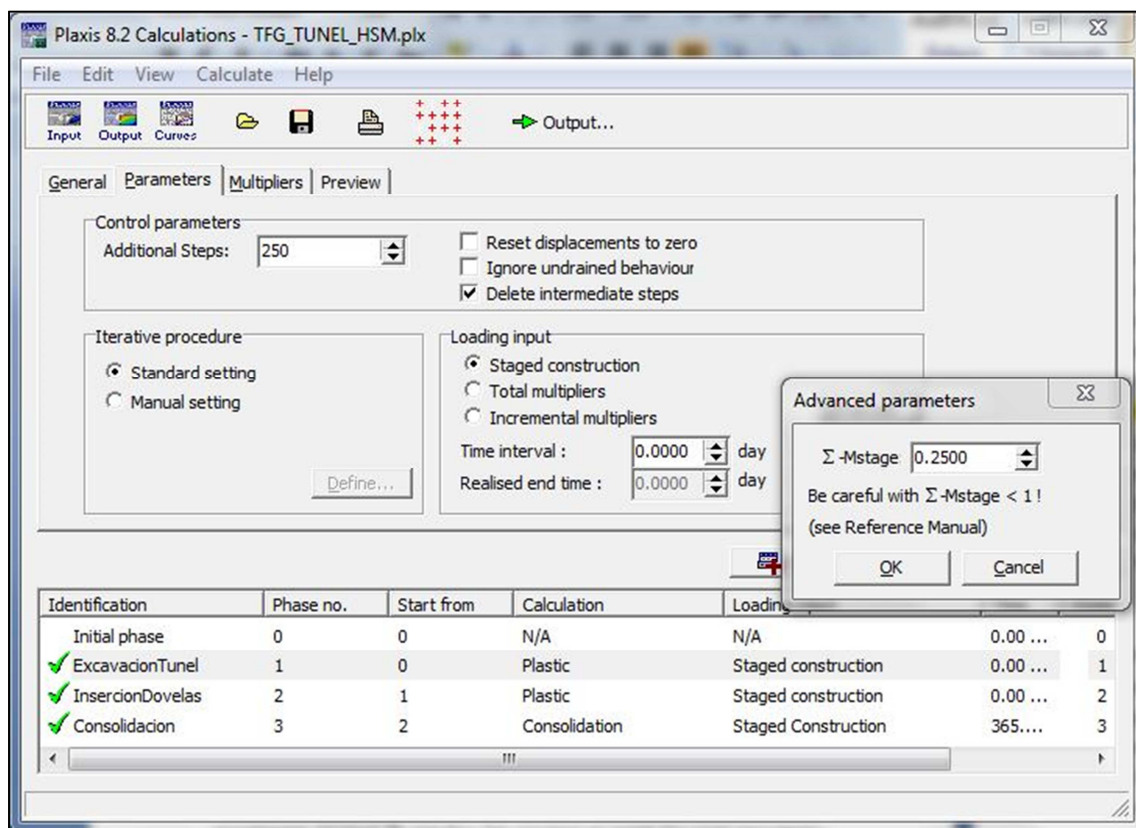


Figura 23. Menú de introducción del valor de ΣM_{stage}

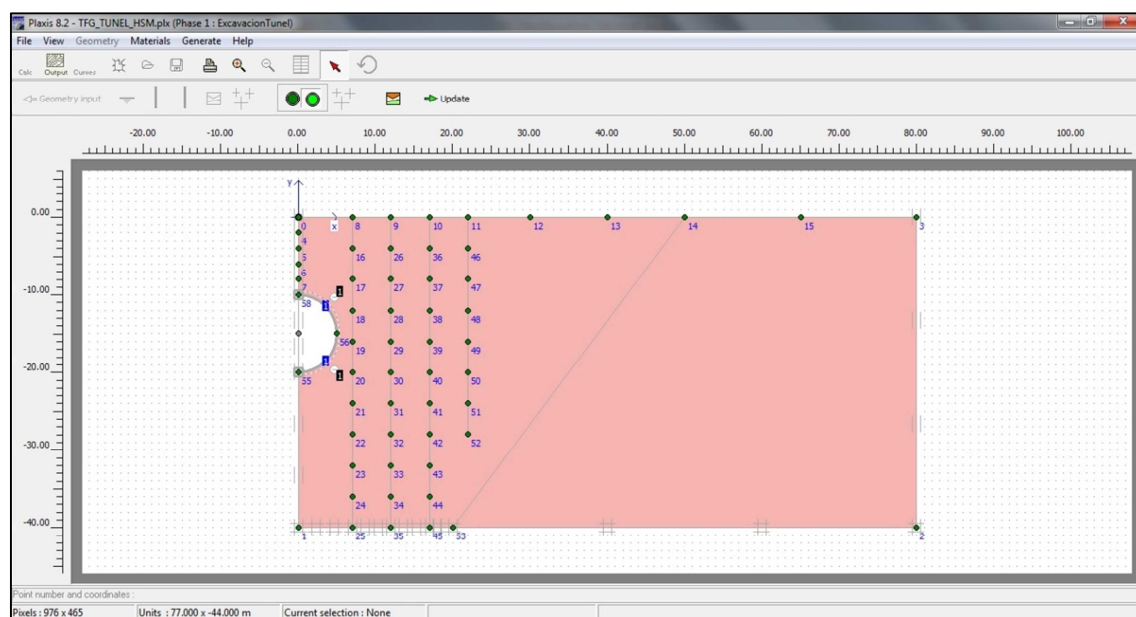


Figura 24. Aspecto de la geometría de PLAXIS en la Fase 1 (excavación del túnel sin colocar revestimiento)

5.1.2. Fase 2: Inserción de las dovelas (revestimiento) después de la excavación

A medida que la tuneladora va excavando el túnel, hay un pequeño margen de tiempo en el que el terreno asienta. Dependiendo de la rapidez con la que se ponga el revestimiento dentro del túnel éste asiento puede ser mayor o menor. En el caso de esta fase de PLAXIS, el siguiente paso después de la deformación de la excavación sería activar el revestimiento del túnel que sostendrá el terreno (figuras 25 y 26).

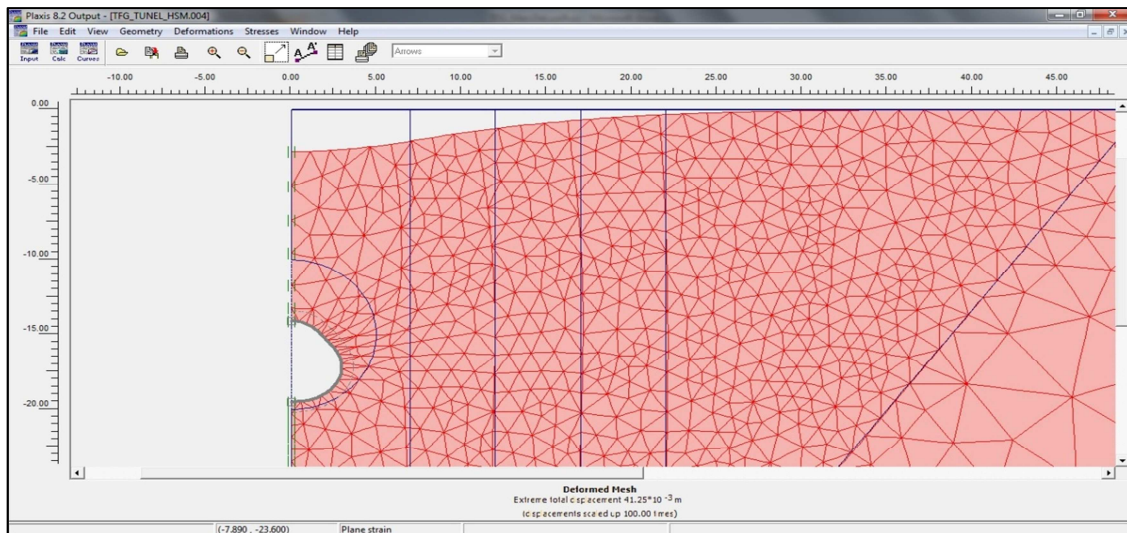


Figura 25. Asiento del terreno debido a la excavación (escala vertical aumentada 100 veces)

De esta manera activando el revestimiento, el túnel quedaría de la siguiente manera. Se recuerda que en nuestro caso, ya se impuso un valor de $\sum Mstage$ que produce una pérdida de volumen consecuentemente por la relajación de los puntos de la malla de Elementos Finitos (pérdida de volumen en términos generales).

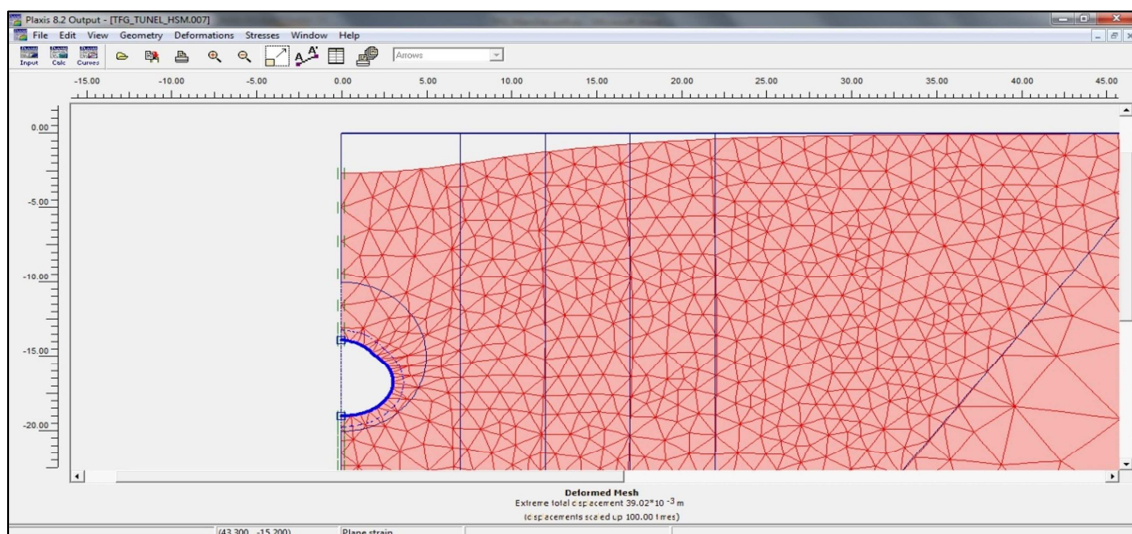


Figura 26. Revestimiento introducido en el túnel después de la excavación (escala vertical aumentada 100 veces)

Una vez ya se ha colocado el revestimiento, el último paso a tener en cuenta es la consolidación del terreno, es decir, nuestra fase 3 del cálculo.

5.1.3. Fase 3: Consolidación del terreno (365 días)

En el momento en el que el revestimiento ya está colocado, el túnel en sí como estructura quedaría finalizado, pero tenemos que tener en cuenta que estamos en una construcción en condiciones no drenadas, por lo que habrá un tiempo requerido para que la presión de poros en la zona de excavación y alrededores vuelva a ser la presión de poros hidrostática.

En nuestro caso, hemos impuesto un tiempo de 365 días, tiempo normalmente suficiente como para que la presión de poros que se ha visto afectada durante la excavación vuelva a su estado hidrostático. Cabe recordar que durante éste tiempo de vuelta a la presión hidrostática se sigue produciendo asiento en el terreno, aunque de manera más lenta y en menor cantidad que durante la fase de excavación e inmediatamente posteriormente a ésta. En la figura 27 se puede observar la opción del tiempo de consolidación en el programa PLAXIS:

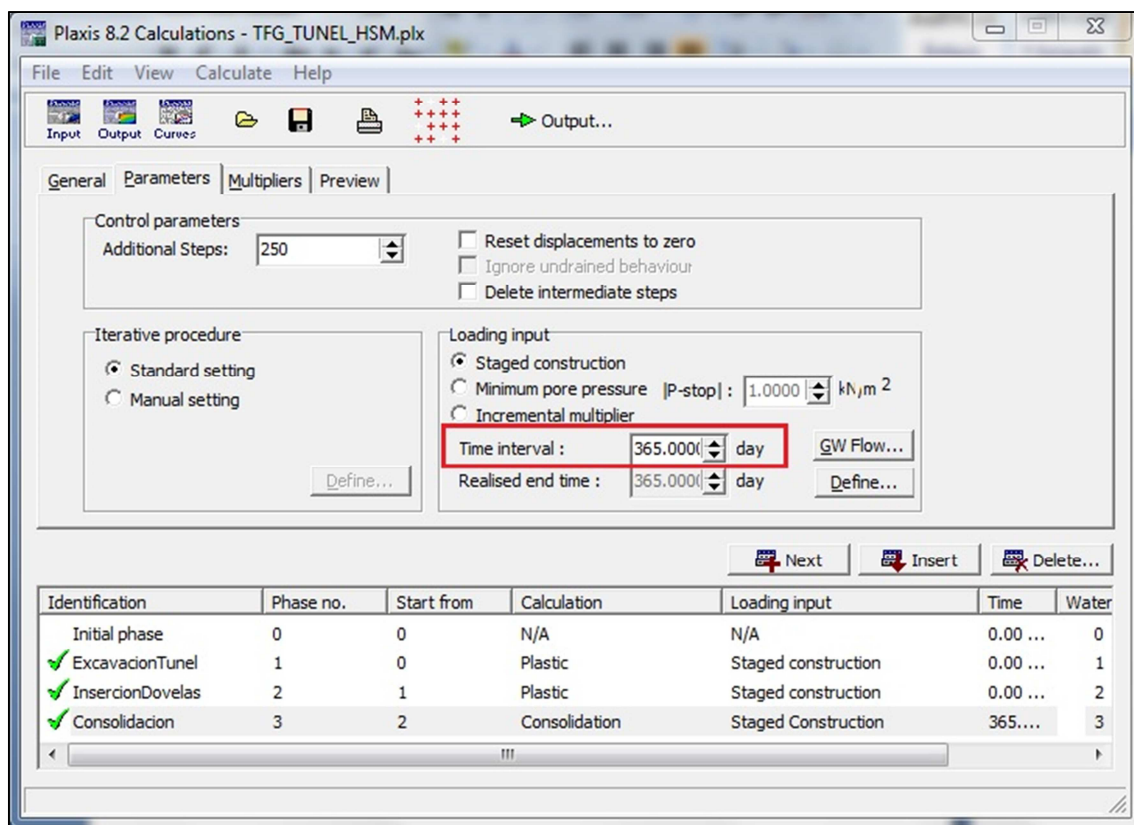


Figura 27. Panel de PLAXIS con el intervalo de tiempo marcado a 365 días en la fase 3 de la construcción del túnel

Finalmente podemos ver en las figuras 28 y 29, después de haber calculado todas las fases, el resultado final de la construcción del túnel. Se muestran dos imágenes diferentes, la primera (figura 28) con la escala vertical aumentada 100 veces, y la segunda (figura 29) en escala real. Nótese como en la escala real, visualmente es muy difícil percibir el asiento, ya que éste en realidad ha sido centimétrica.

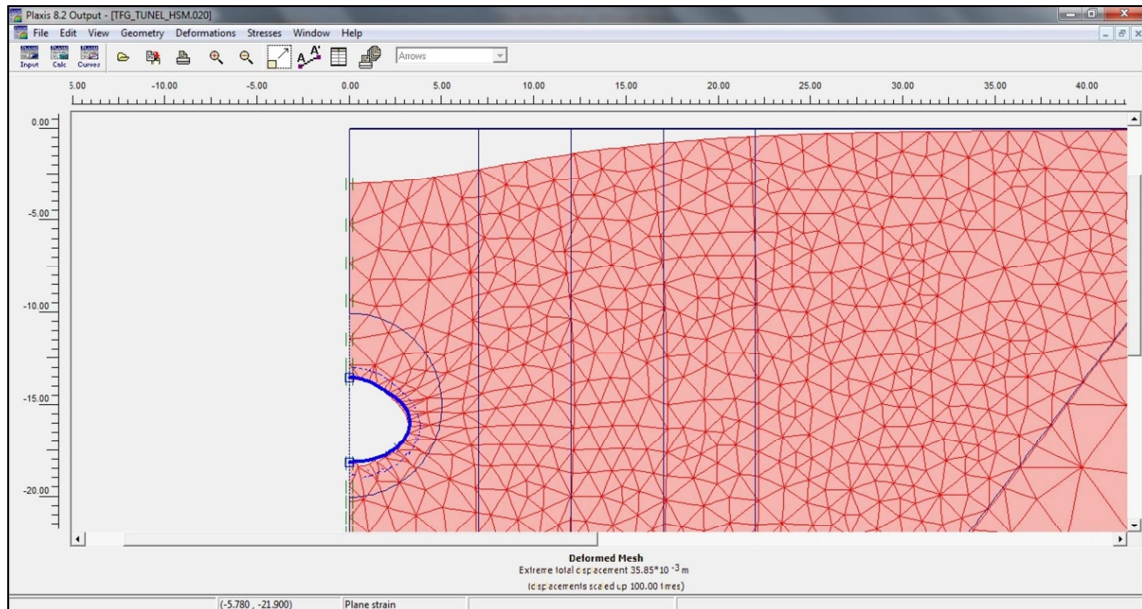


Figura 28. Visualización del asiento en superficie con la escala vertical aumentada 100 veces

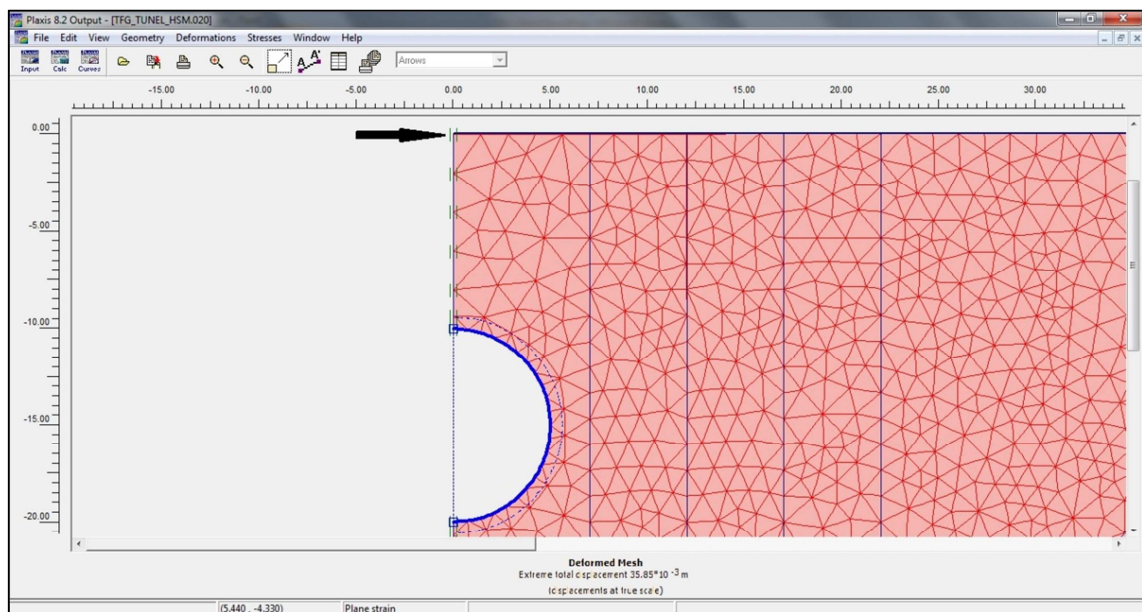


Figura 29. Visualización del asiento en superficie a escala real

6. Análisis de Sensibilidad y Resultados Obtenidos

Como ya se ha mencionado en el punto 3 de este trabajo, el procedimiento que se ha llevado a cabo para realizar el estudio de sensibilidad en casos elastoplásticos ha sido a partir de la definición de derivada mostrada en la ecuación [3.9], ya que es una ecuación general de derivada (diferencia hacia delante).

Así pues, con el software PLAXIS se ha procedido a hacer diferentes cálculos en las etapas de la construcción del túnel, con diferentes valores del parámetro objetivo en cuestión (respecto a un valor inicial prefijado) para estudiar su sensibilidad.

En éste punto del trabajo, se deben introducir las bases informativas necesarias para el cálculo de la sensibilidad de un parámetro, ya que para obtener una buena sensibilidad del parámetro objetivo, la misma derivada tiene que ser consistente, es decir, debemos tener la certeza de que la sensibilidad de un parámetro se calcula a partir de una derivada que cumple con la definición (que efectivamente los valores de aumento del parámetro sean diferenciales y que estos mantengan una cierta convergencia o constancia). En los siguientes puntos se mostrará a qué nos referimos por sensibilidad de derivada con ciertas imágenes y tablas.

6.1. Procedimiento de cálculo de la Sensibilidad de un parámetro

El procedimiento de cálculo de la sensibilidad, es largo debido a la cantidad de veces que se tiene que calcular con PLAXIS cada uno de los casos con diferentes valores de un mismo parámetro para poder obtener posteriormente la sensibilidad.

Supongamos como ejemplo que queremos evaluar la sensibilidad de los movimientos en algunos puntos frente al parámetro K_0 . A partir de un valor inicial introducido por defecto, tomando como ejemplo el caso de $K_0 = 0.531$, calculamos un valor nuevo del parámetro K_0 a partir de un incremento constante que nosotros añadimos al valor inicial. Así entonces, aumentando el valor inicial de K_0 en un 1% obtendríamos que el nuevo valor de $K_{0(1\%)}$ sería $K_0 + 0.01 * K_0 = 0.531 + 0.00531 = \mathbf{0.536}$. De esta manera tenemos que el valor inicial por defecto de $K_0 = \mathbf{0.531}$, el valor aumentado en un 1% es $\mathbf{0.536}$ y el incremento de aumento es un **1%**. El procedimiento a seguir con el software PLAXIS para calcular la sensibilidad de K_0 aumentando su valor inicial en un 1% sería:

1. Cálculo del túnel con valores iniciales por defecto de todos los parámetros.
2. Cálculo del túnel con valor de K_0 aumentado en un 1% y dejando los demás parámetros con su valor inicial por defecto.

3. Aplicar definición de derivada según la ecuación [3.9] ya que gracias a PLAXIS disponemos de movimientos verticales y horizontales del terreno.

Si aplicamos la definición de derivada tenemos que:

$$\frac{\partial X}{\partial K_0} = \frac{X(K_{0(1\%)}) - X(K_0)}{\Delta K_0 = K_{0(1\%)} - K_0} \quad [6.1]$$

Es así como a partir de movimientos del terreno debidos a la construcción del túnel, podemos calcular la sensibilidad de un parámetro objetivo. Si la derivada refleja un valor grande, ésta nos está informando de que a causa del cambio de valor en el parámetro K_0 , se han producido movimientos importantes en el terreno, es decir, los nuevos movimientos con $K_{0(1\%)}$ son bastante más grandes que con el valor inicial por defecto de K_0 , la que nos dice que esos movimientos son sensibles a K_0 . En caso de que el valor de la derivada fuera pequeño, indicaría que el parámetro K_0 no influiría, ya que la diferencia entre los movimientos nuevos y los iniciales por defecto seria pequeña. En la tabla 3 podemos observar como se ha procedido a calcular esta derivada a partir de los datos obtenidos en PLAXIS:

FASE 3:CONSOLIDACIÓN								
Node	X [m]	Y [m]	Ux [10 ⁻³ m]	Uy [10 ⁻³ m]	DUx [10 ⁻⁶ m]	DUy [10 ⁻⁶ m]	dX	dY
1	0	-38.962449	0	0.00027936	0	-1.629E-05	0	0.04656047
2	0	-39.308299	0	0.00018316	0	-1.5226E-05	0	0.03052693
3	0	-39.65415	0	8.9999E-05	0	-6.2693E-06	0	0.01499983
4	0	-40	0	0	0	0	0	0
5	0.35	-40	0	0	0	0	0	0
6	0.7	-40	0	0	0	0	0	0
7	1.05	-40	0	0	0	0	0	0
8	0.35	-39.308299	-6.2594E-06	0.00018322	-2.741E-06	-1.269E-05	-0.00104323	0.03053742
9	0.35	-39.65415	-3.067E-06	9.0217E-05	8.5232E-07	-7.0636E-06	-0.00051116	0.01503613
10	0.7	-39.65415	-6.0805E-06	8.9929E-05	1.3001E-07	-6.82E-06	-0.00101341	0.01498822
11	0.84113402	-38.512252	-3.137E-05	0.00040686	-6.6444E-06	-1.2596E-05	-0.0052284	0.06781082
12	0.59556701	-38.737351	-1.9139E-05	0.00034274	-5.59E-06	-1.3479E-05	-0.00318986	0.05712263
13	0.94556701	-39.083201	-2.2363E-05	0.0002449	-6.6811E-06	-1.1322E-05	-0.00372712	0.04081623
14	1.05	-39.65415	-9.711E-06	9.055E-05	-5.9746E-06	-5.4927E-06	-0.00161849	0.01509168

Tabla 3. Tabla Modelo de EXCEL utilizada para el cálculo de las derivadas horizontales y verticales. X e Y son las coordenadas de la geometría. Ux y Uy son los desplazamientos producidos en la geometría debido a la construcción del túnel y dX y dY son las respectivas derivadas de movimientos verticales y horizontales.

a partir de los movimientos que PLAXIS nos proporciona (U_x en el caso de movimientos horizontales y U_y en el caso de los verticales) se aplica la ecuación [3.9] para cada uno de los aumentos porcentuales escogidos respecto al valor inicial de cada parámetro y así poder obtener lo que podemos ver en las dos últimas columnas de la

derecha, dX y dY , que corresponden a los valores de la derivada horizontal y vertical de cada nodo de la malla de Elementos Finitos creada inicialmente.

También podemos obtener los movimientos horizontales y verticales que se han producido durante la excavación del túnel y posteriormente al final de la etapa de consolidación, cosa que nos permitirá saber cuál ha sido el asiento total y de esta manera también ser capaces de calcular la pérdida de volumen del túnel durante su construcción. Si se ha procedido correctamente, el volumen perdido en forma de asiento en superficie debería ser igual a la pérdida de volumen del túnel durante la construcción en condiciones no drenadas.. En la siguiente figura 30 se muestran datos obtenidos para un caso en concreto de la cubeta de asientos en superficie.

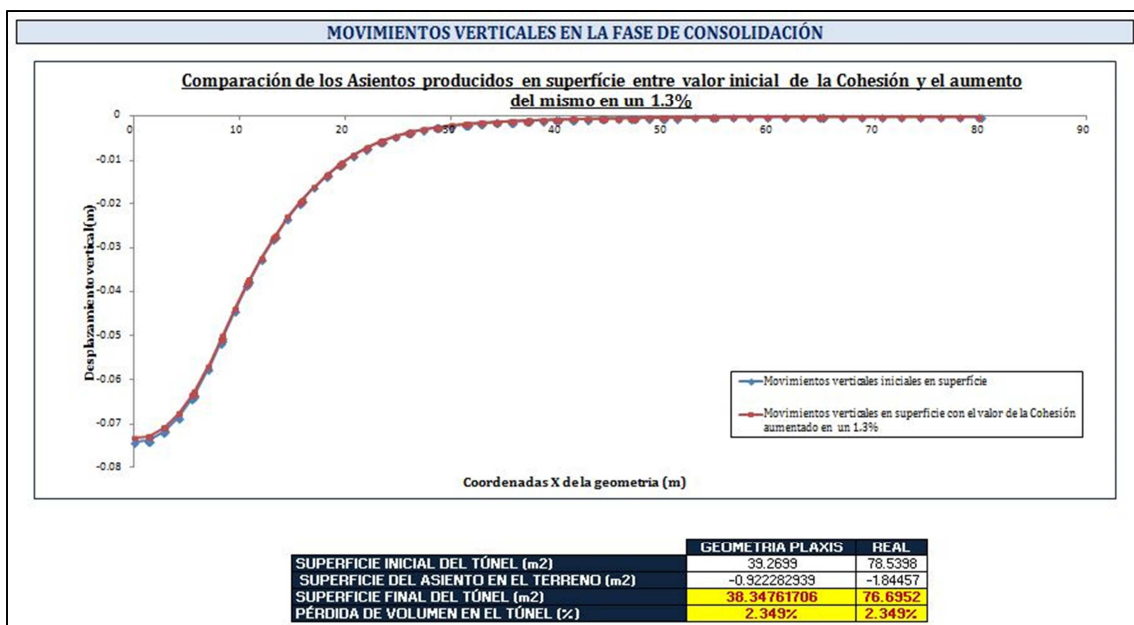


Figura 30. gráfico que muestra la diferencia del asiento en superficie entre el valor inicial de la Cohesión (valor=10KPa) y la misma aumentando su valor inicial en un 1.3% (10,13 KPa).

6.2. Consistencia de la Sensibilidad de la derivada

Como hemos mencionado anteriormente, para saber si la sensibilidad respecto a un parámetro es consistente, tenemos que cumplir las condiciones de derivada. Éste aspecto es muy importante, dado que no es lo mismo hacer un estudio de la sensibilidad de un parámetro comparando su valor inicial con un aumento del 1% respecto a éste, que comparándolo con un aumento del 20%. En los dos casos obtendremos unos resultados de sensibilidad, pero unos serán consistentes y otros no. Primeramente, la definición de derivada se define como algo pequeño, diferencial, cambios de valor infinitesimales, por lo tanto nuestro aumento porcentual a la hora de estudiar la

sensibilidad respecto a un parámetro deberá estar acotado dentro de un intervalo suficientemente pequeño donde podamos obtener resultados consistentes teniendo una diferencia de valor entre valores iniciales y valores de aumento suficientemente buena. La segunda condición es que la derivada sea consistente en cuanto a su valor respecto al valor de aumento, es decir, si hacemos diferentes aumentos porcentuales respecto a un valor inicial dado y nos fijamos en un mismo punto de la malla, gráficamente esta derivada tiene que ser más estable o menos estable en alguno de los aumentos porcentuales que hemos calculado. Si hacemos el estudio de la sensibilidad de un parámetro con un valor porcentual escogido, dónde la derivada es muy diferente al del siguiente aumento porcentual escogido, significa que la derivada es inestable, puesto que el resultado de la sensibilidad será completamente diferente entre esos dos aumentos porcentuales, por lo tanto, el hecho de encontrar un rango de aumento porcentual donde la derivada sea más o menos estable y sepamos que dará un resultado parecido entre valores de aumento porcentuales consecutivos, será un rango consistente en el que fijarnos para posteriormente determinar la sensibilidad del parámetro que queramos. Nótese que si se reduce mucho el incremento del parámetro, se pueden tener errores numéricos en el cálculo de la derivada.

En este trabajo se ha llegado a la conclusión que tanto cerca de rotura como lejos de rotura el intervalo estable en la derivada se produce entre los aumentos 1.3% y 1.5%, incluyendo los dos anteriores tanto para derivadas de movimientos horizontales como verticales. En las siguientes figuras 31 a 34, extraídas del estudio de la sensibilidad de la derivada desde el valor inicial del parámetro objetivo hasta un aumento de hasta el 20% respecto al valor inicial se puede observar éste intervalo óptimo.

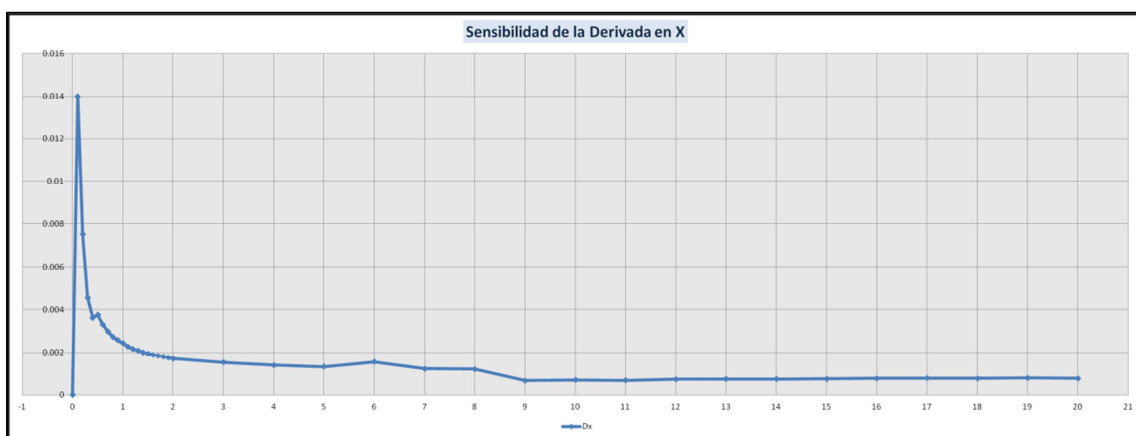
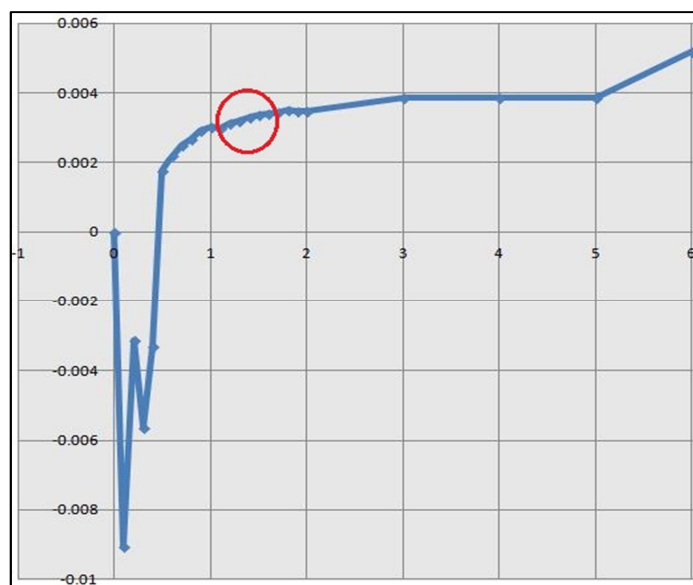
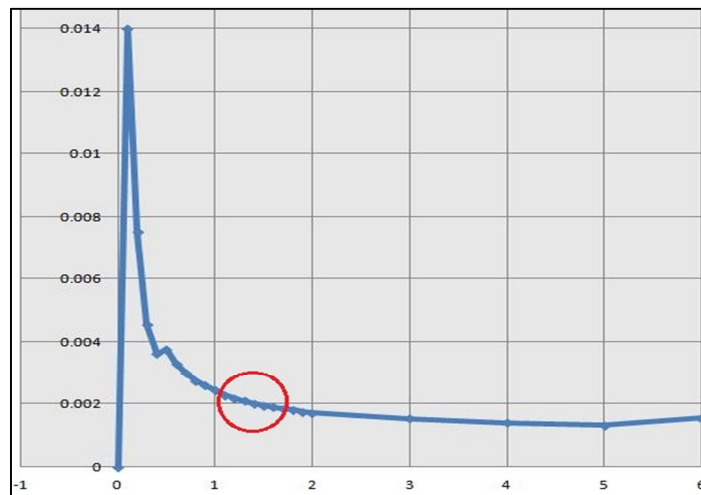
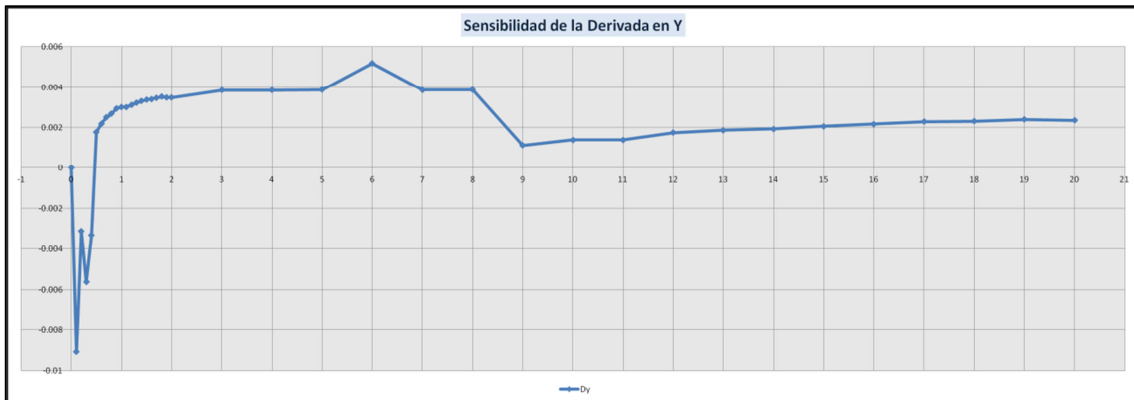


Figura 31. Sensibilidad (estabilidad) de la derivada del movimiento horizontal respecto del parámetro cohesión cerca de rotura

En las siguientes figuras 33 y 34 se muestra una ampliación del intervalo óptimo para hacer el estudio de la sensibilidad del parámetro.



6.3. Representación de la Sensibilidad de un parámetro con el software SURFER

Una vez tenemos delimitado el rango óptimo para el cálculo de la sensibilidad de un parámetro, se procede a representar dicha sensibilidad con el software SURFER. El software SURFER nos permite crear mapas de isolíneas donde podemos apreciar cuales son las zonas de nuestra geometría con mayor sensibilidad y cuales con menor sensibilidad.

Dadas las coordenadas X e Y de nuestra geometría y el valor de las derivadas horizontales y verticales, podemos crear estos mapas de isolíneas (mapas de líneas de igual valor de sensibilidad) con SURFER. Posteriormente se ha procedido a mejorar el mapa de isolíneas con escala de color para poder visualizar con más facilidad las envolventes alrededor del túnel con más sensibilidad y menos sensibilidad.

En las siguientes figuras 35 y 36 se muestra los diferentes pasos a seguir con SURFER para obtener los mapas.

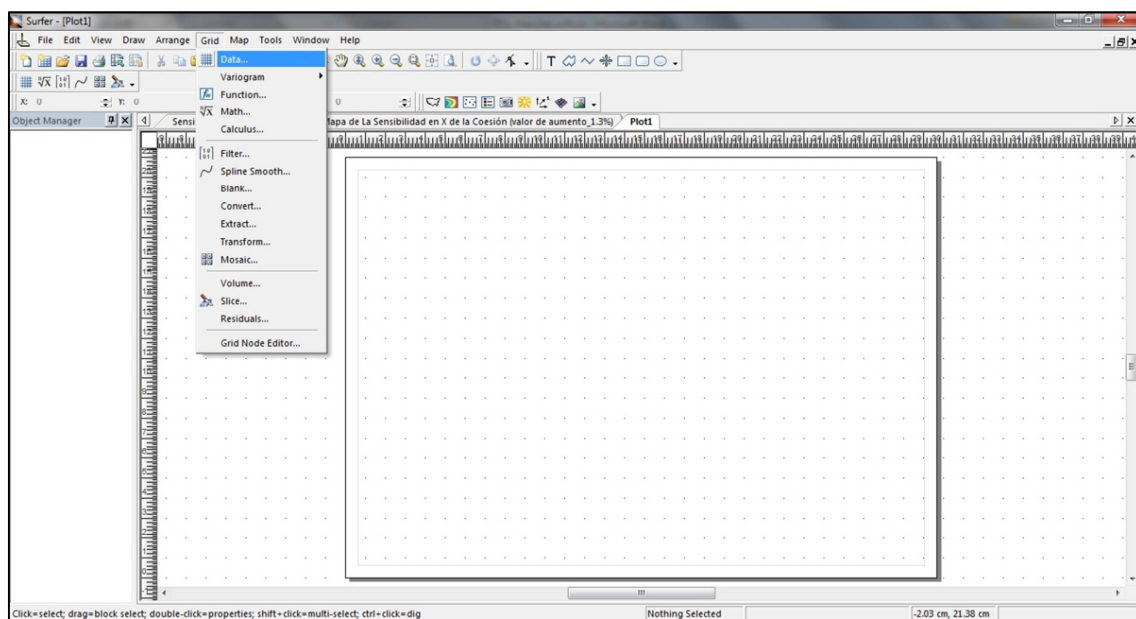


Figura 35. Visualización del programa SURFER antes de crear el mapa de isolíneas.

Como se puede observar, nada más abrir el programa se procede a proporcionar la información de la geometría y de los valores de la derivada en cada nodo de la malla. En este caso, escogemos el documento EXCEL donde se tengan los datos necesarios y se seleccionan las columnas de la hoja Excel que contengan las coordenadas X e Y de la geometría creada para la construcción del túnel y la columna con los valores de las derivadas horizontales y verticales de cada nodo de la malla de Elementos Finitos.

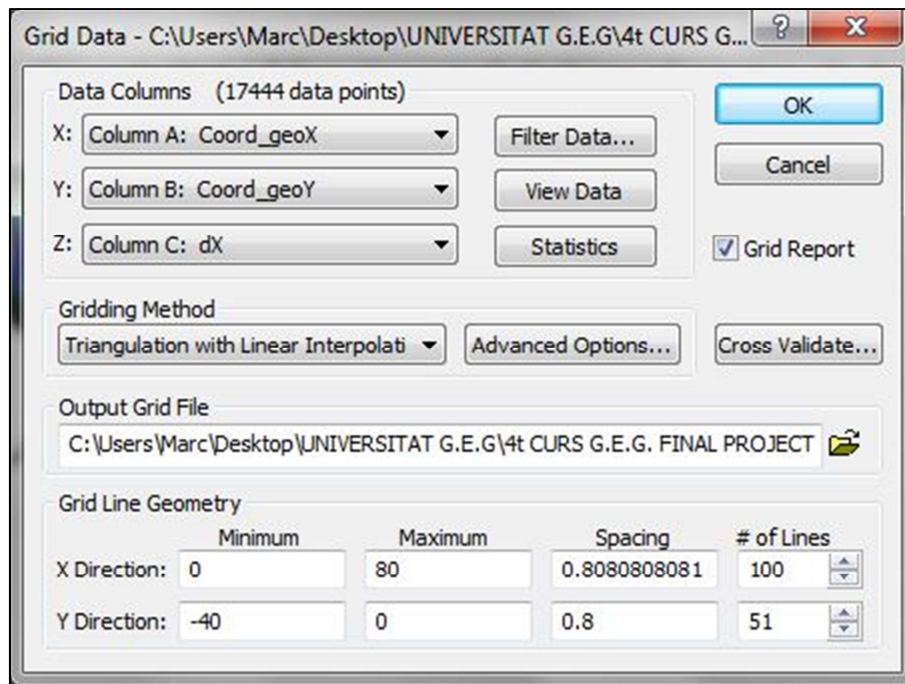


Figura 36. Datos de la geometría y valor de derivadas introducidos en SURFER.

En nuestro caso, X: es igual a las coordenadas X de la geometría, Y: es igual a las coordenadas Y de la geometría y Z: son los valores de las derivadas en X en este caso. Una manera de asegurarse de que el procedimiento es correcto, sería fijarse en los datos que se muestran en el *Grid Line Geometry*. Se observa que el máximo valor de profundidad de la geometría coincide con el valor mostrado (40m por debajo de la superficie, en este caso -40) y efectivamente coincide también con la longitud de la geometría (80m).

Finalmente al marcar OK, el software procede al cálculo de un mapa con los datos proporcionados en forma de malla (GRID). Si seguidamente nos posicionamos en el menú superior como el que se muestra en la figura 36 y ponemos *Map>>new>>Contour Map* se nos abrirá una nueva ventana para escoger el mapa en formato GRID creado anteriormente e inicialmente se mostrará un mapa como el que vemos en la figura 37.

Como se ha dicho anteriormente, existen ciertas opciones que nos permiten visualizar este tipo de mapas de manera más fácil, atribuyendo escala de colores según el valor entre las diferentes isolíneas. Lo único que se tiene que hacer, es hacer doble clic sobre el mapa creado y posicionarnos en *Levels>>Fill>>Foregroud Colour* y escoger una escala de color diferente a la actual (por defecto se muestra sin ninguna). De esta manera el mapa puede comprenderse mucho más fácilmente y se puede ver con mucha más claridad las zonas más sensibles y las menos sensibles.

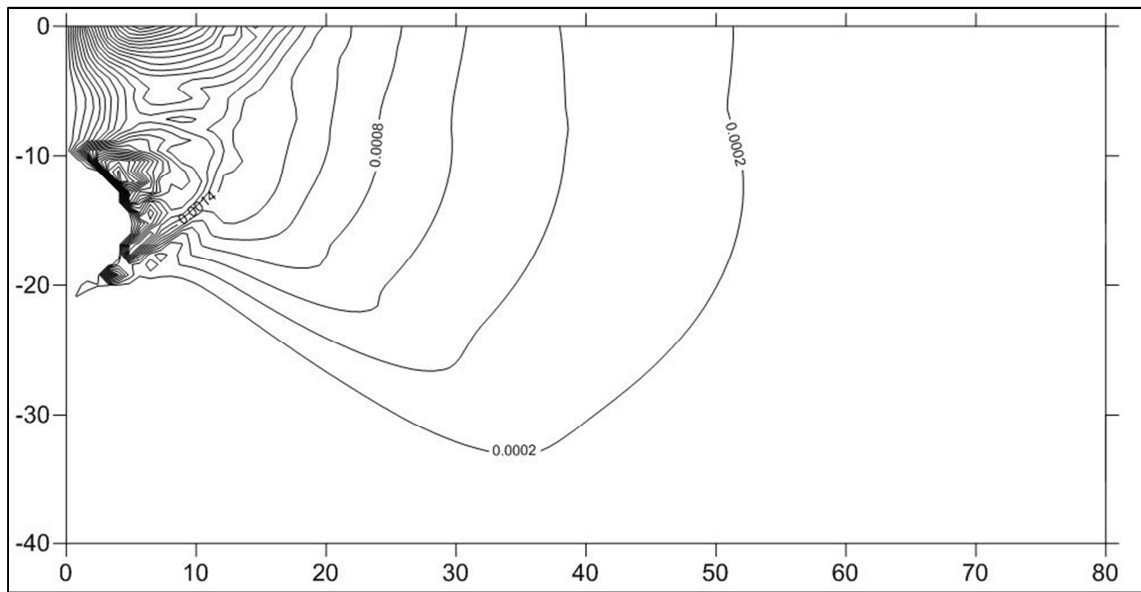


Figura 37. Mapa de isolíneas de la sensibilidad del movimiento horizontal respecto al parámetro Cohesión con un aumento del 1.3% respecto al valor inicial.

En la figura 38 se puede observar como visualmente es más atractivo y se puede apreciar mejor los diferentes niveles de sensibilidad que existen en el mapa de la figura 37.

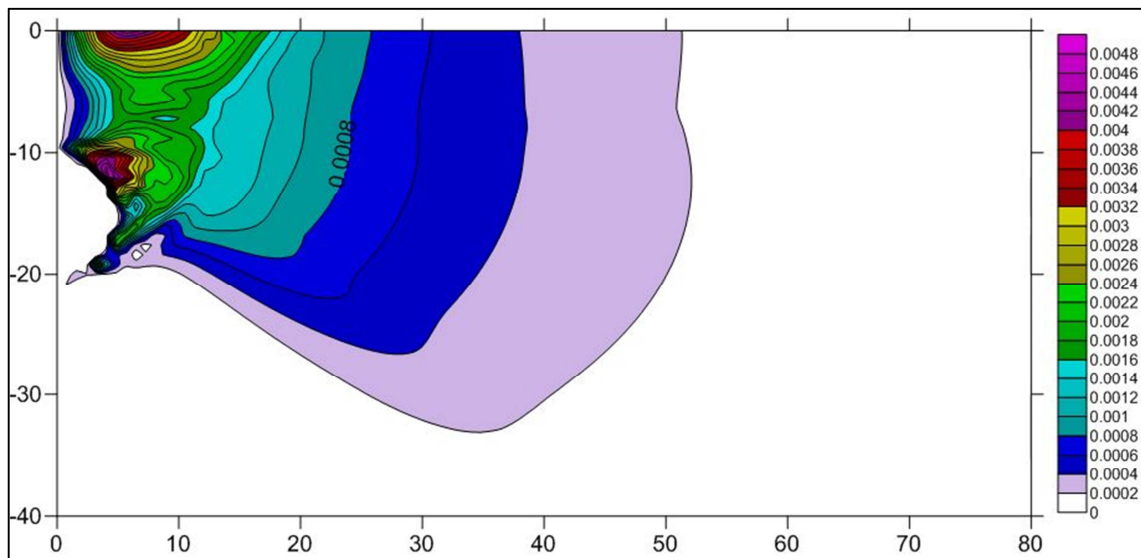


Figura 38. Mismo mapa de la Figura 36 con escala de color para la sensibilidad existente.

Posteriormente veremos cómo gracias a la escala de colores, podemos extraer numéricamente valores de la malla de Elementos Finitos para poder demostrar numéricamente que los valores de sensibilidad son consistentes.

6.4. Resultados obtenidos con el modelo Hardening Soil

En este trabajo, como ya se ha mencionado anteriormente, se presentarán los resultados obtenidos usando el modelo Hardening Soil, especialmente los casos cerca de rotura ya que son los más importantes a tener en cuenta en la construcción del túnel. El modelo Hardening Soil es adecuado en muchos problemas reales y como se puede ver, su formulación matemática es mucho más compleja que la del modelo elástico y el modelo de Mohr-Coloumb. En los anejos del trabajo se pueden encontrar todos los mapas de sensibilidad obtenidos con el modelo del Hardening Soil, tanto movimientos en el terreno como presión de agua.

Para el Modelo Hardening Soil, se mostrarán los resultados de los 5 parámetros estudiados (K_0 , Cohesión, E_{50} , E_{ur} y Φ (ϕ)), con los mapas de sensibilidad de movimientos en el terreno y presión de agua para los diferentes aumentos porcentuales de valor del parámetro respecto al valor inicial por defecto.

También se mostrarán resultados de la pérdida de volumen en el túnel para cada parámetro estudiado haciendo las comparaciones pertinentes entre ellos así como la demostración numérica que corrobora la alta o baja sensibilidad respecto a los parámetros estudiados.

6.4.1. Sensibilidad respecto al parámetro K_0 Cerca de rotura

6.4.1.1. Sensibilidad del movimiento Horizontal (X) respecto al parámetro K_0

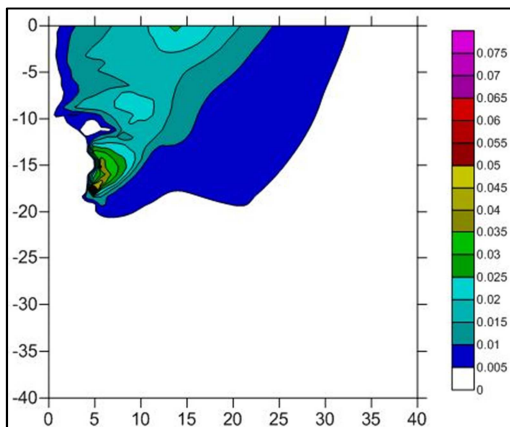


Figura 39. Sensibilidad de X respecto a K_0 (1.3%)

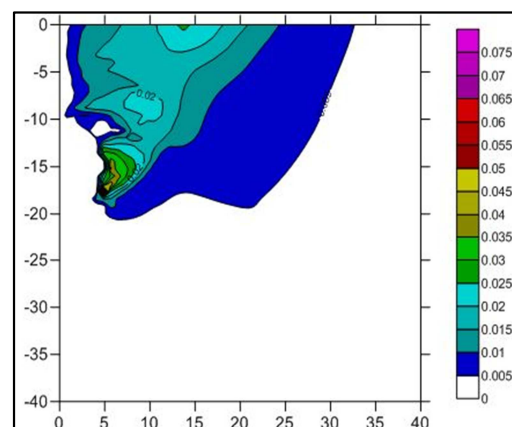


Figura 40. Sensibilidad de X respecto a K_0 (1.4%)

Como se puede observar en las figuras 39, 40 y 41, tanto el aumento del 1.3%, el aumento del 1.4% así como el de 1.5% son prácticamente iguales. En la figura 42 se muestra el de 15% donde sí que se puede apreciar un cambio notable en la sensibilidad.

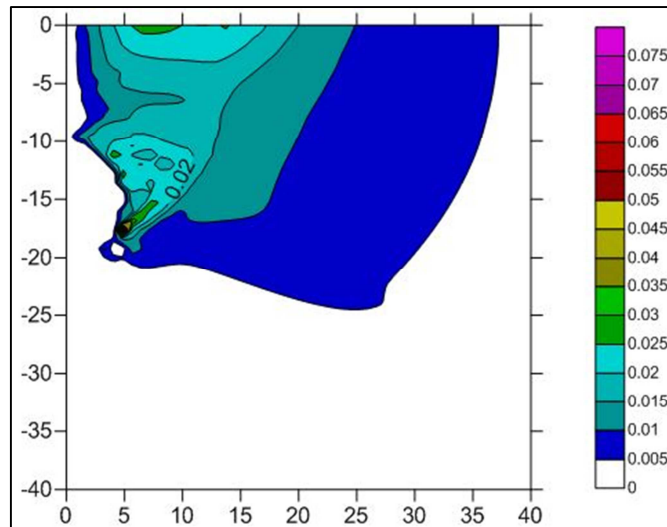


Figura 41. Sensibilidad de X respecto a Ko (1.5%)

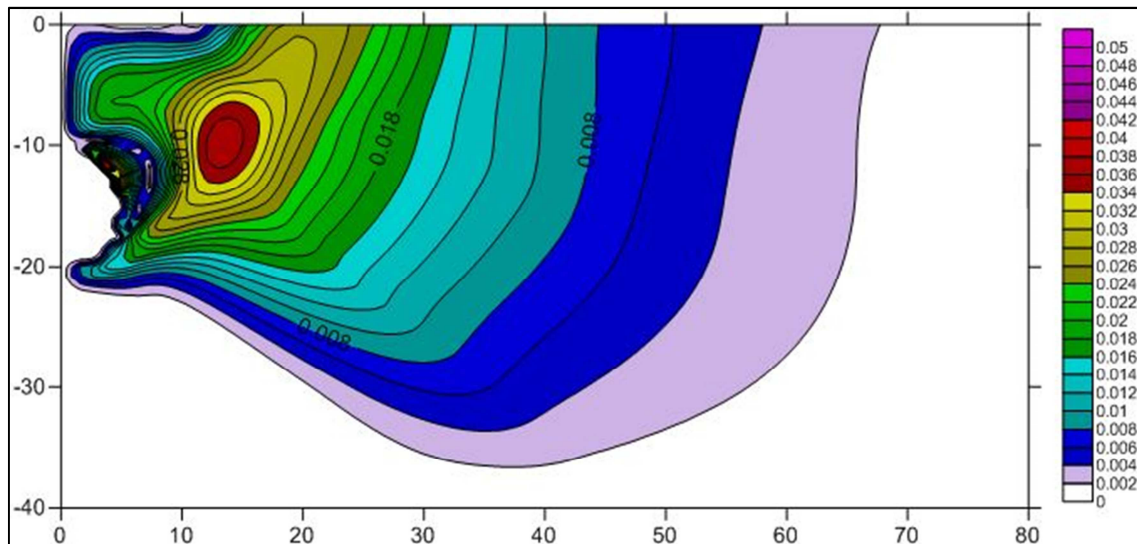


Figura 42. Sensibilidad de X respecto a Ko (15%)

Observamos que los aumentos escogidos como óptimos en éste trabajo ya mencionados anteriormente (1.3%, 1.4% y 1.5%) son muy parecidos entre sí, cosa que demuestra una estabilidad consistente de la derivada y por lo tanto podemos proceder al cálculo de la sensibilidad del parámetro sin problemas. Al contrario, con el aumento del 15%, vemos como el mapa de sensibilidad es completamente diferente, la extensión de la sensibilidad es mucho más amplia y podemos ver una zona de máxima sensibilidad color rojo en el centro, cosa que en los otros tres aumentos no nos aparece, por lo que otra vez, de manera visual, podemos ver que la diferencia entre los % de aumentos respecto al valor inicial del parámetro es importante, y puede contribuir a una mala identificación de la sensibilidad si no se corrobora que el rango óptimo escogido cumple

con las definiciones de derivada mencionadas al principio de éste punto. Como consecuencia pues, el aumento del 15% no sería un valor consistente a escoger para llevar a cabo dicho estudio.

En el trabajo se procederá a mostrar sólo un aumento del rango óptimo (1.3%). Los demás mapas del aumento del 1.3% se podrán encontrar en el apartado de anejos clasificados convenientemente.

6.4.1.2. Sensibilidad del movimiento Vertical (Y) respecto al parámetro K_0

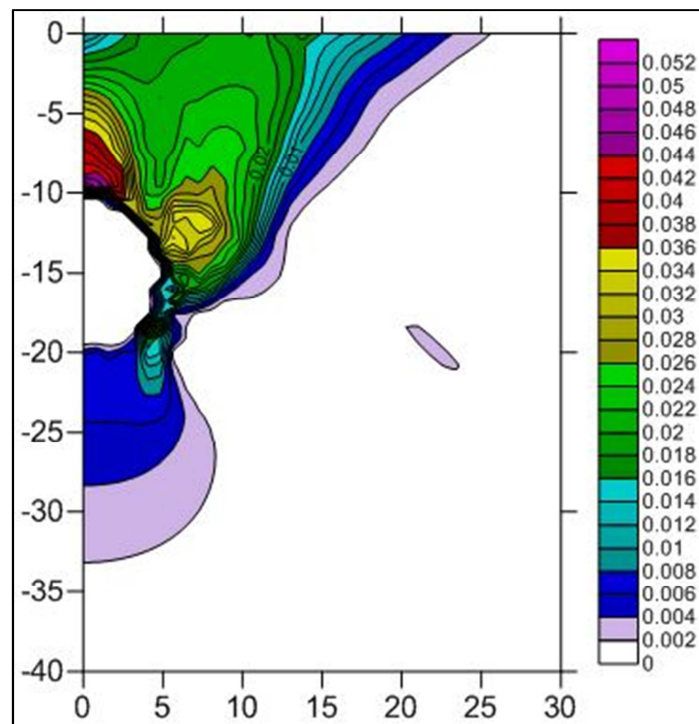


Figura 43. Sensibilidad de Y respecto al parámetro K_0 (1.3%)

La figura 43 muestra el mapa de sensibilidad, y se observa como el aumento de 1.3% mantiene la zona de máxima sensibilidad justo en la parte superior del túnel. También, la figura 43 muestra en este caso, cuál sería la zona sensible del terreno donde poner nuestro material de medición para obtener un valor certero del parámetro K_0 a partir de los movimientos verticales del terreno.

6.4.1.3. Sensibilidad de la presión de Agua respecto al parámetro K_0

Al igual que la sensibilidad de los diferentes parámetros del terreno, también podemos hacer el mismo estudio para ver cuál es el cambio que la presión de agua sufre al construir el túnel. Los mapas de la sensibilidad de la presión de agua no son tan

“limpios” como los mapas de sensibilidad de movimientos. En la figura 44 se puede ver con claridad la sensibilidad de la presión de agua.

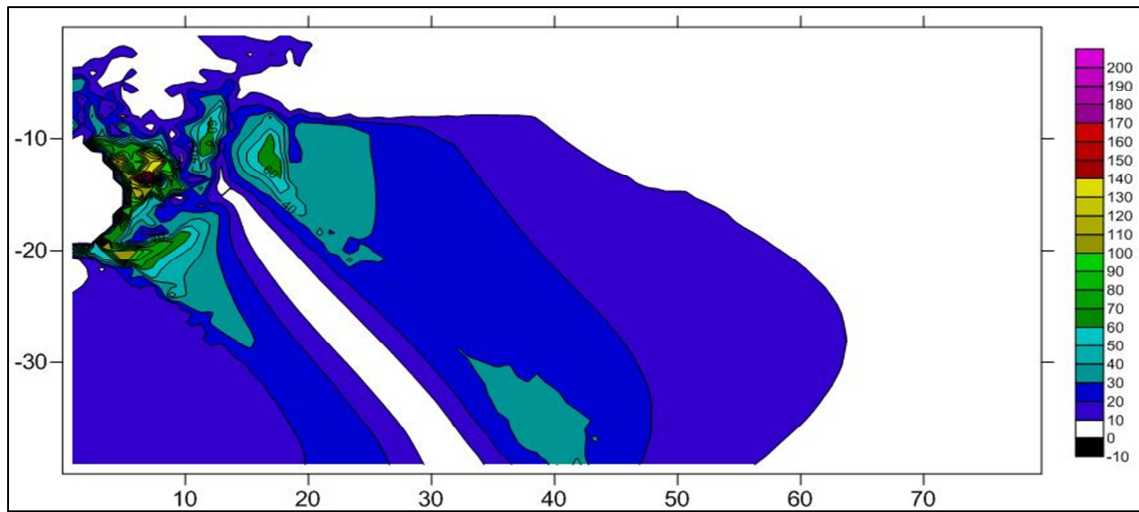


Figura 44. Sensibilidad de la Presión de agua respecto al parámetro K_o con un aumento del 1.3%

6.4.2. Sensibilidad respecto al parámetro Φ (ϕ) Cerca de rotura

6.4.2.1. Sensibilidad del movimiento Horizontal y Vertical respecto al parámetro Φ

(ϕ)

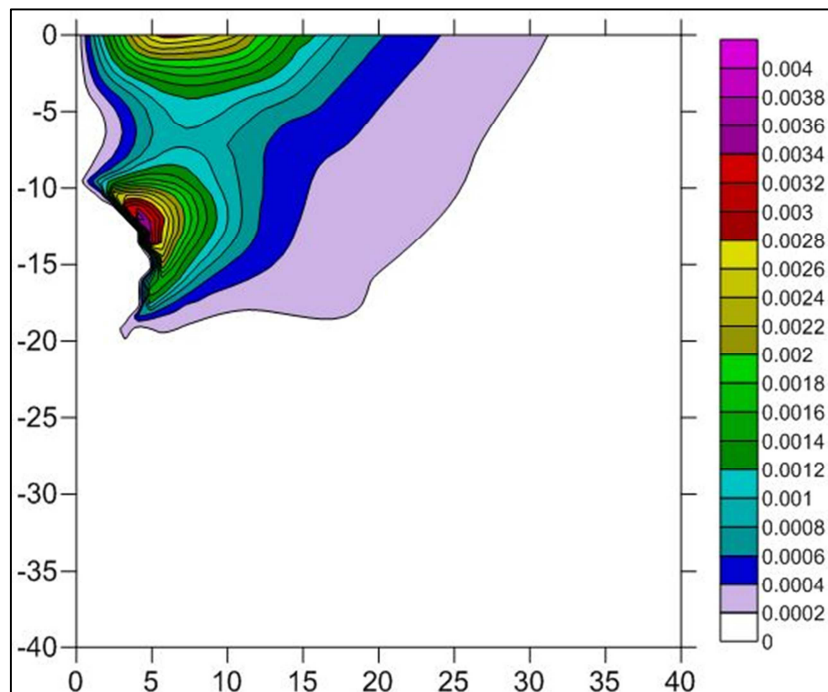


Figura 45. Sensibilidad de X respecto al parámetro Φ (1.3%)

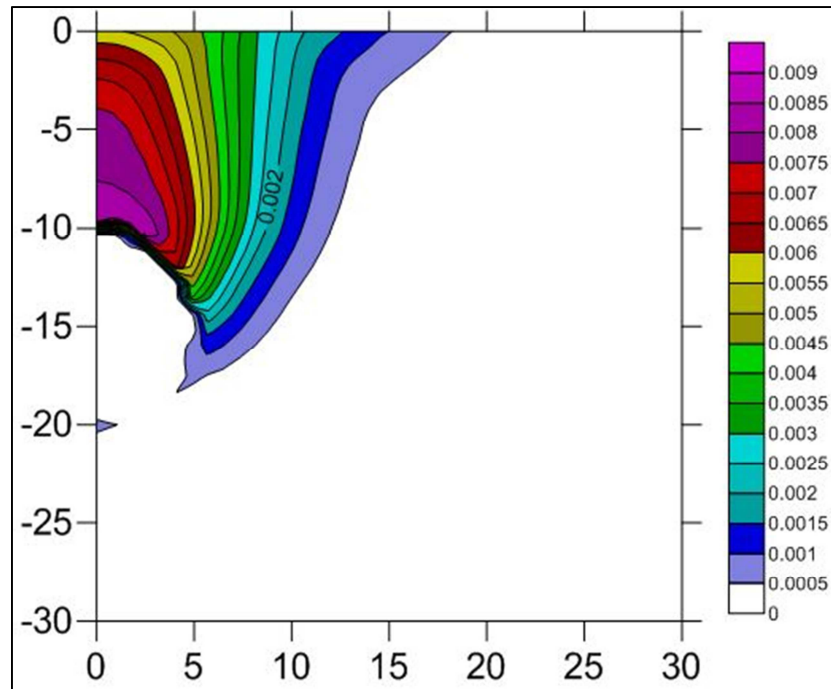


Figura 46. Sensibilidad de Y respecto al parámetro Phi (1.3%)

En el caso de la sensibilidad del movimiento vertical (figura 46), el parámetro Phi sigue un poco la misma línea que en el caso de K_0 ya que la zona de máxima sensibilidad sigue estando justo encima del túnel, aunque la zona sensible es más extensa en el caso de Phi.

En cambio, en el caso de la sensibilidad del movimiento horizontal, la zona sensible vemos como se ha trasladado en Phi a la zona superior derecha del túnel cosa que con K_0 se encontraba en la zona inferior derecha y el área sensible es mucho más pequeña.

6.4.2.2. Sensibilidad de la presión de Agua respecto al parámetro Phi (ϕ)

Al igual que en el parámetro K_0 , el mapa de la sensibilidad no es muy atractivo visualmente aunque se puede observar una zona pequeña de máxima sensibilidad en la parte inferior derecha-central del túnel (figura 47). En la figura 48 ampliada se puede apreciar mejor ésta zona sensible.

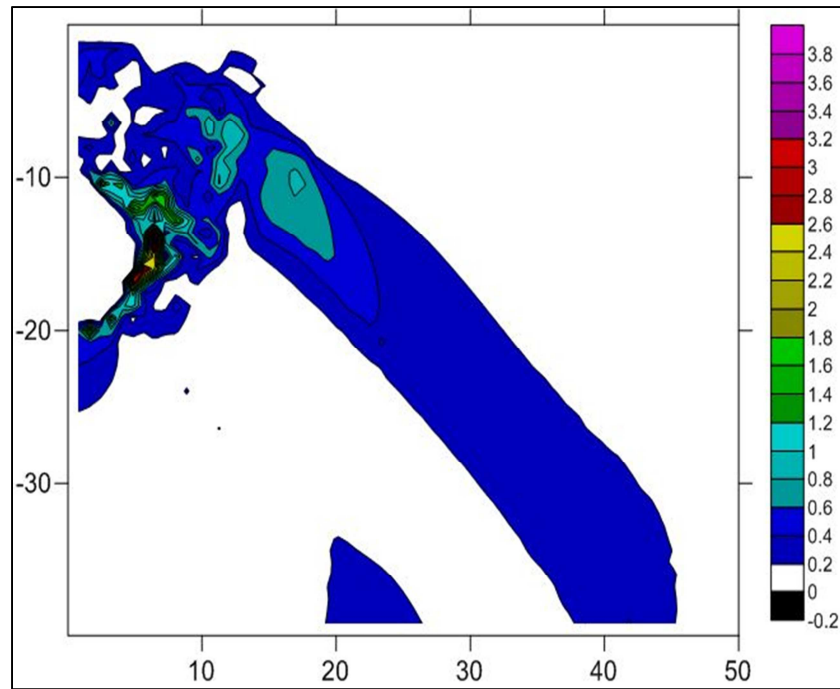


Figura 47. Sensibilidad de la presión de Agua respecto al parámetro Φ (1.3%)

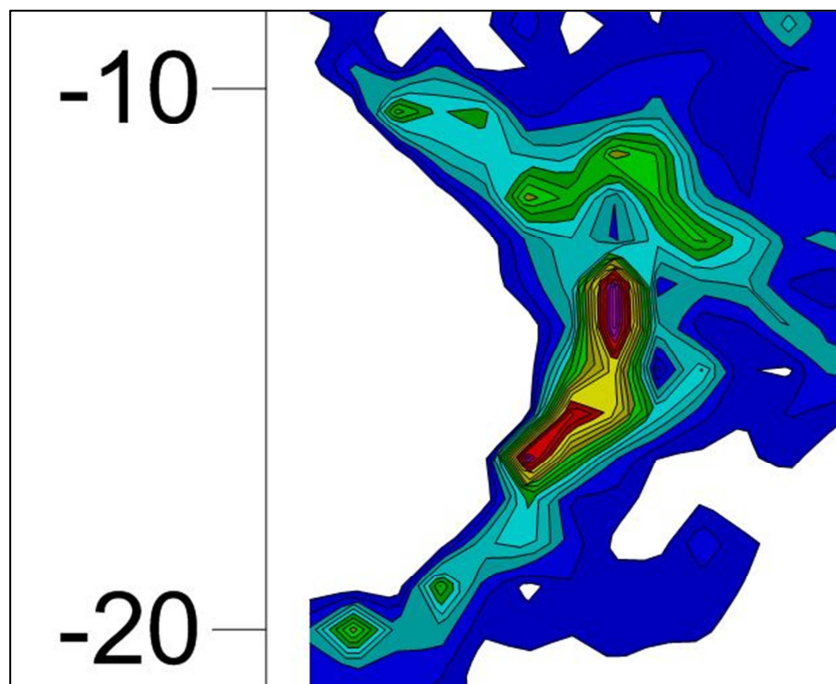


Figura 48. Ampliación de la figura 47

Comparando este mapa de sensibilidad con el mapa de sensibilidad de la presión de agua respecto a K_0 , vemos que hay una zona coincidente aunque la variación de la presión de agua sea menos notable.

6.4.3. Sensibilidad respecto al parámetro Cohesión Cerca de rotura

6.4.3.1. Sensibilidad del movimiento Horizontal y Vertical respecto al parámetro Cohesión

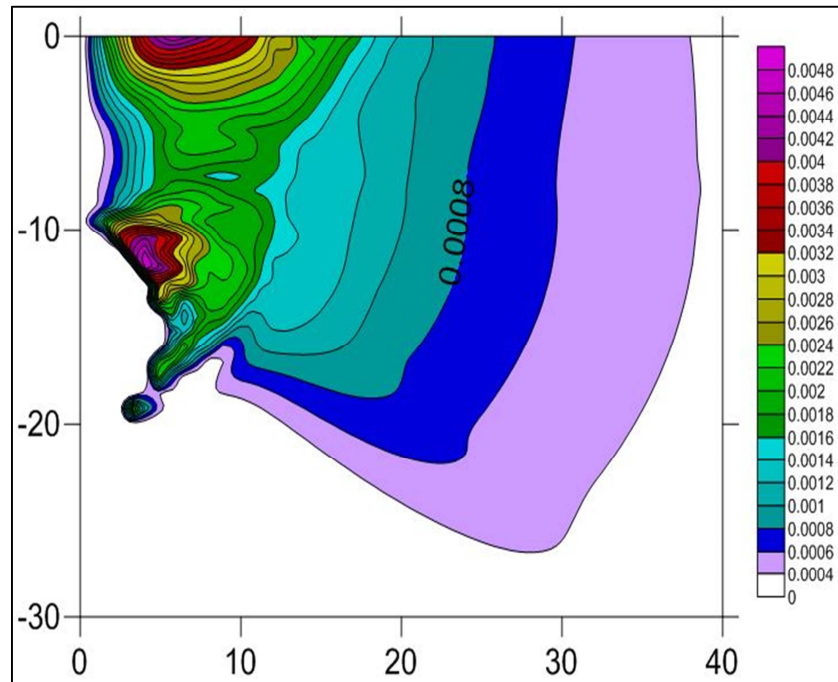


Figura 49. Sensibilidad de X respecto al parámetro Cohesión (1.3%)

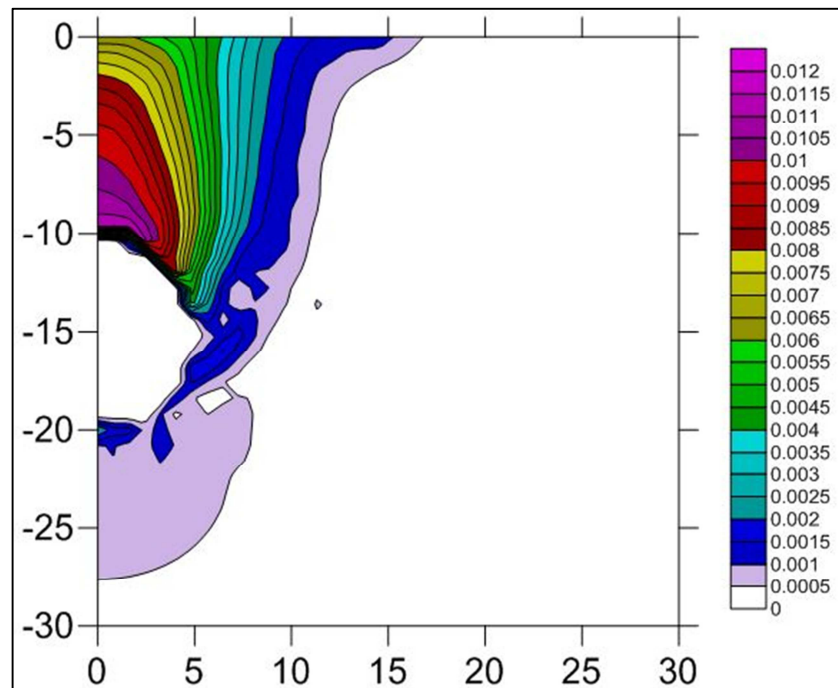


Figura 50. Sensibilidad de Y respecto al parámetro Cohesión (1.3%)

Como podemos observar en la figura 48 y en la figura 49, el único patrón que cambia un poco es el de la sensibilidad de X, mostrándonos una zona sensible en la parte

superior de la geometría, justo en superficie. Gracias a esta zona sensible en superficie sería posible extraer el valor idóneo del parámetro en cuestión sin tener que perforar hasta el túnel para colocar instrumentación.

En el caso de la sensibilidad de Y , el patrón de sensibilidad es muy parecido a los dos mapas anteriores de K_0 y Φ (φ).

6.4.3.2. Sensibilidad de la Presión de Agua respecto al parámetro Cohesión

En el siguiente mapa de la Presión de Agua respecto al parámetro Cohesión (figura 51) vemos como la sensibilidad es más pequeña que en los casos anteriores. La variación de la presión de agua es menor con el cambio del parámetro en cuestión.

A continuación se puede ver también una segunda figura (figura 52) que muestra un zoom con la zona sensible.

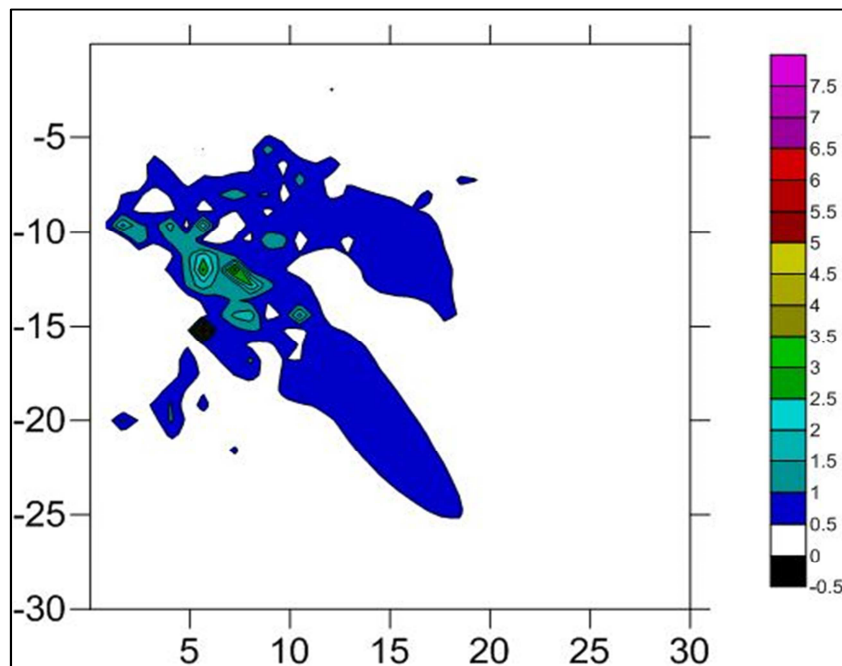


Figura 51. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Cohesión (1.3%)

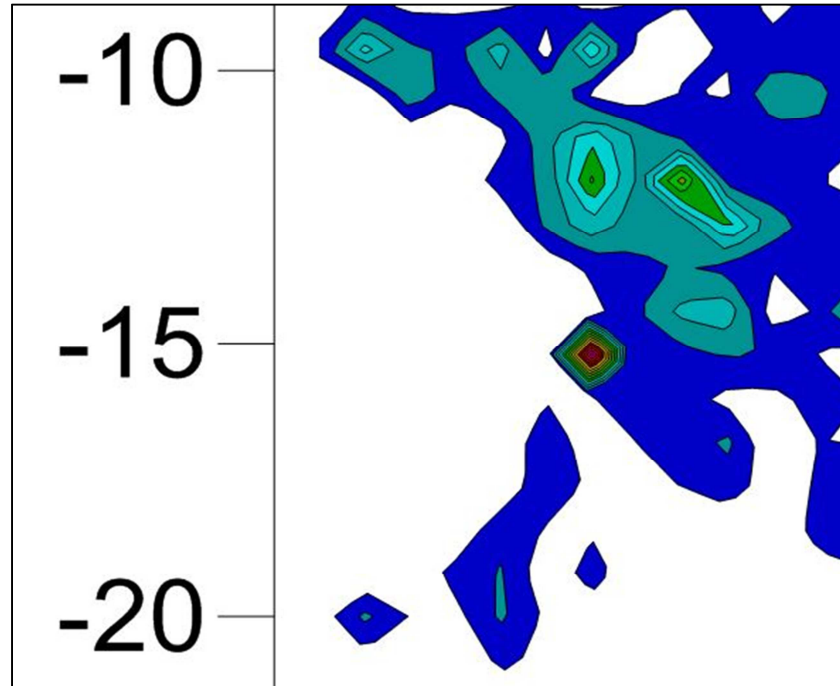


Figura 52. Ampliación de la figura 50

6.4.4. Sensibilidad respecto al parámetro E50 Cerca de rotura

6.4.4.1. Sensibilidad del movimiento Horizontal y Vertical respecto al parámetro E50

A continuación podemos ver como la sensibilidad del parámetro E50 es bastante parecida a la del parámetro Cohesión tanto en X como en Y (figuras 53 y 54).

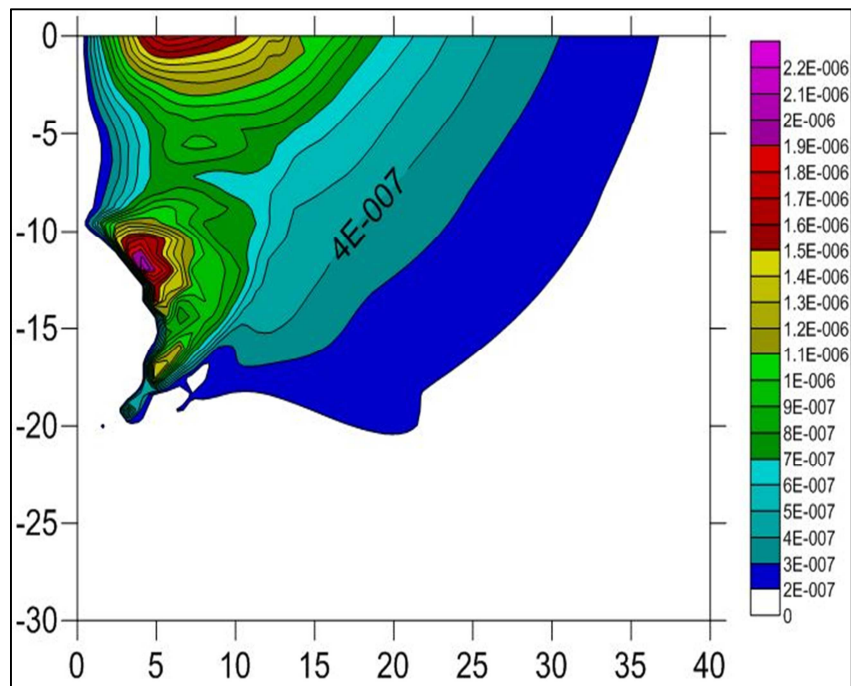


Figura 53. Sensibilidad de X respecto al parámetro E50 (1.3%)

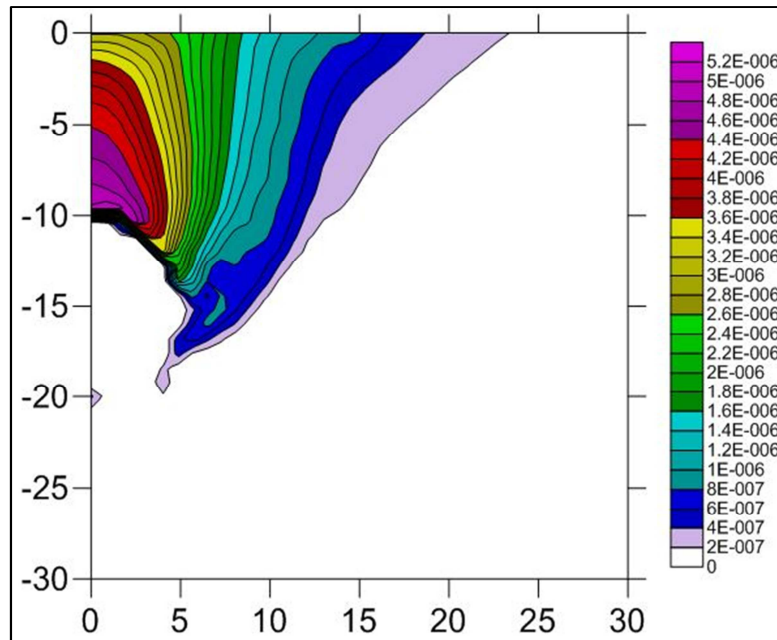


Figura 54. Sensibilidad de Y respecto al parámetro E50 (1.3%)

Podemos apreciar que las zonas de máxima sensibilidad siguen un cierto patrón como en los dos parámetros anteriores. En los movimientos horizontales (X) vemos como en la zona central-superior derecha del túnel encontramos zona de máxima sensibilidad así como en superficie entre los 5m y 10m de separación desde el eje simétrico del túnel y en el mapa de movimientos verticales vemos como la zona de máxima sensibilidad se sigue encontrando por encima del túnel, justo encima del eje de simetría, como ya hemos visto también en el resto de parámetros.

6.4.4.2. Sensibilidad de la Presión de Agua respecto al parámetro E50

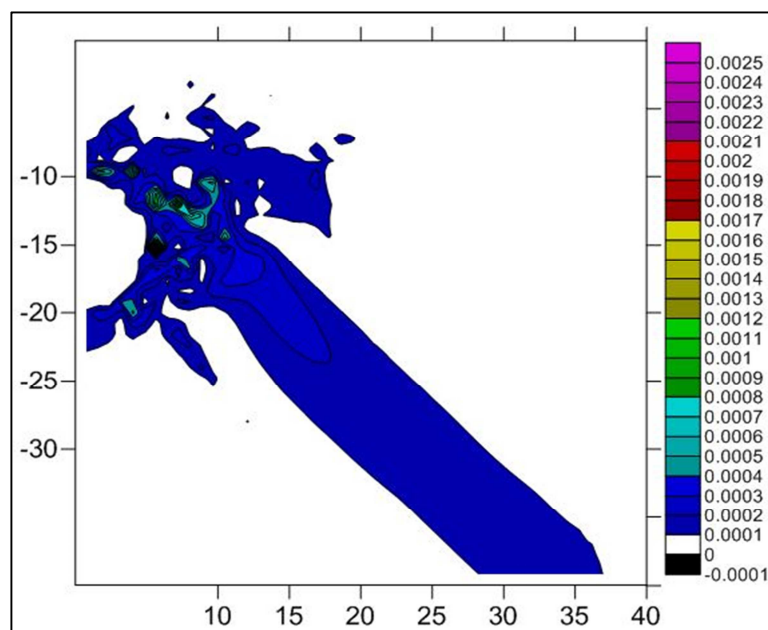


Figura 55. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro E50 (1.3%)

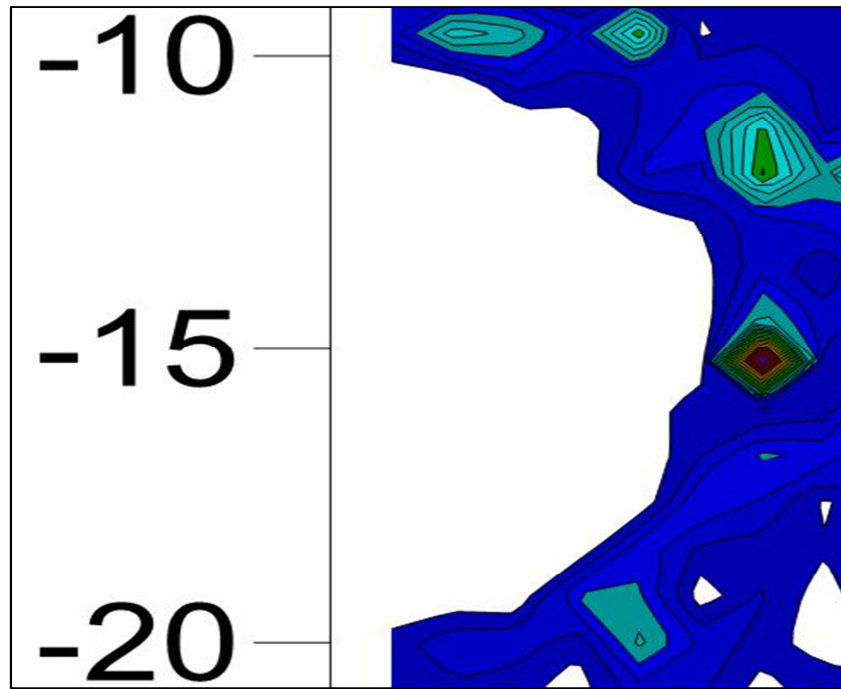


Figura 56. Ampliación de la figura 54

Vemos que la zona de máxima sensibilidad es muy pequeña en la parte central-derecha del túnel (figuras 55 y 56), caso parecido a la sensibilidad de la presión de agua con el parámetro cohesión, aunque aquí se pueden apreciar más cambios en presión de agua como se ve en el mapa.

6.4.5. Sensibilidad respecto al parámetro Eur Cerca de rotura

6.4.5.1. Sensibilidad del movimiento Horizontal y Vertical respecto al parámetro Eur

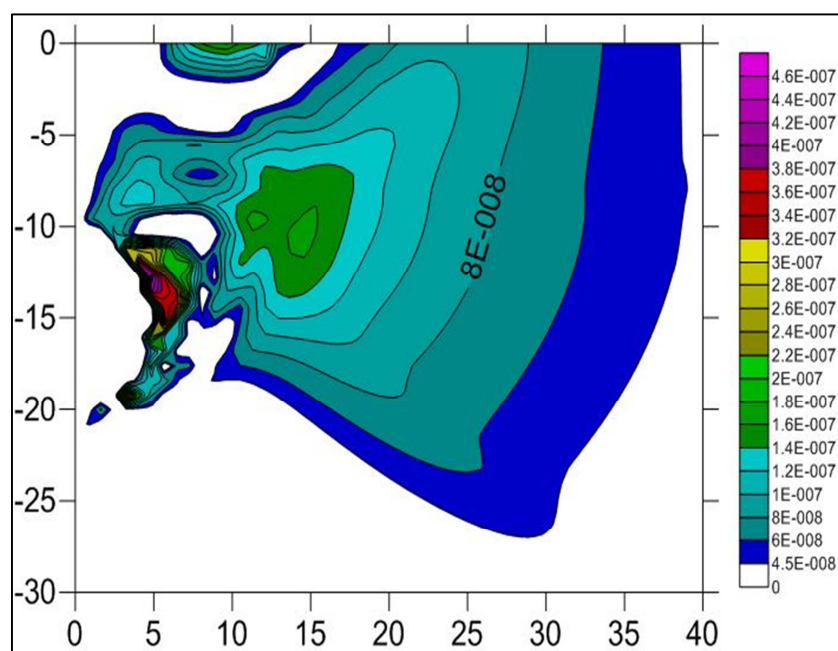


Figura 57. Sensibilidad de X respecto al parámetro Eur (1.3%)

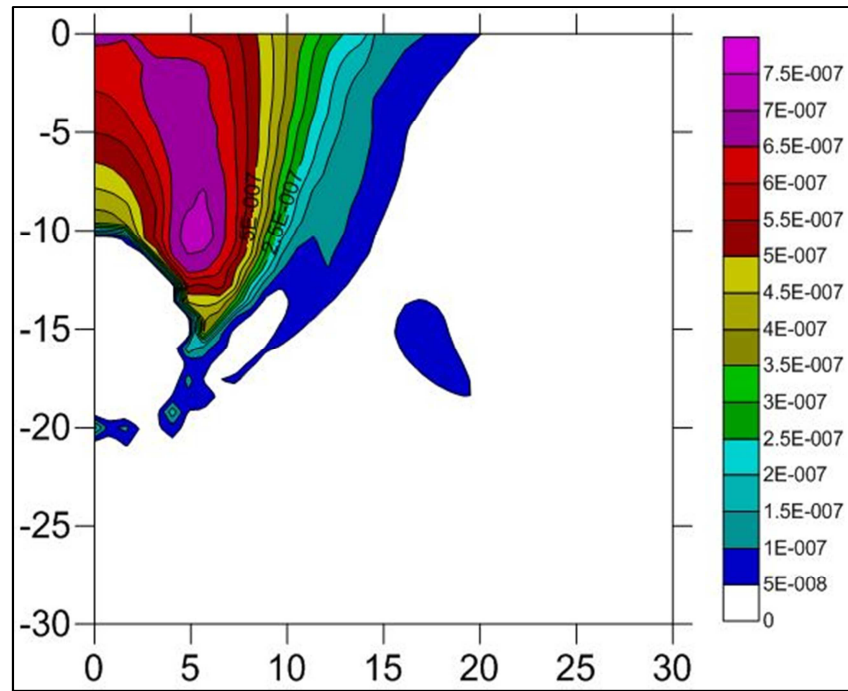


Figura 58. Sensibilidad de Y respecto al parámetro Eur (1.3%)

Como podemos apreciar en las figuras 58 y 59, la Sensibilidad respecto al Parámetro E_{ur} sigue también de cerca el patrón de zonas sensibles que tienen de forma parecida los otros parámetros.

En cuanto a la sensibilidad horizontal, la zona sensible se reduce un poco ya que solo encontramos una zona de máxima sensibilidad en la parte central-derecha de la envolvente del túnel y en los dos parámetros anteriores encontrábamos dos zonas de máxima sensibilidad (en superficie).

En cuanto a la sensibilidad del movimiento vertical, sigue el mismo patrón aproximadamente, seguimos encontrado esa zona de máxima sensibilidad por encima del túnel coincidiendo un poco con el eje de simetría aunque ésta vez la zona sensible es más amplia, por lo que para nuestra ventaja sería más fácil poder encontrar un valor certero del parámetro E_{ur} midiendo movimientos en una zona amplia.

6.4.5.2. Sensibilidad de la Presión de Agua respecto al parámetro Eur

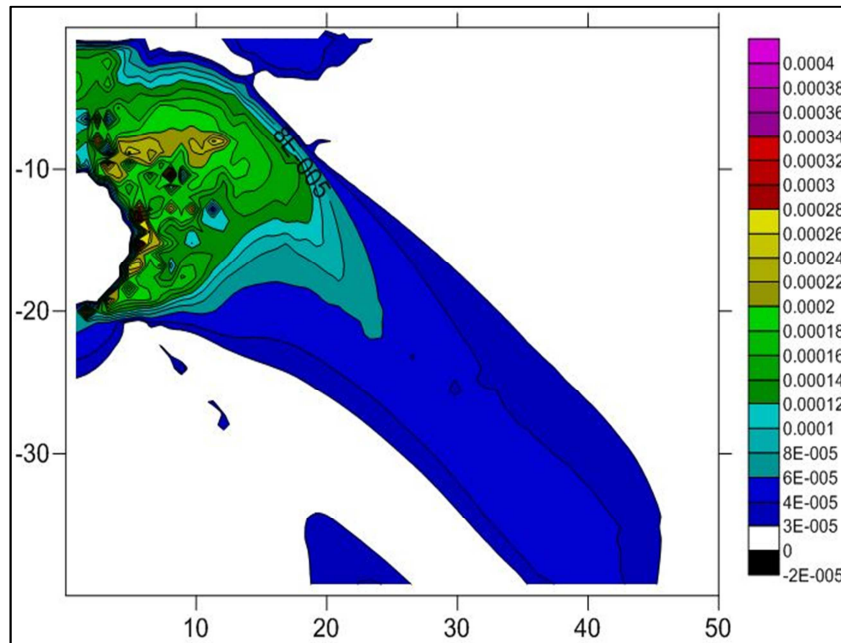


Figura 59. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Eur (1.3%)

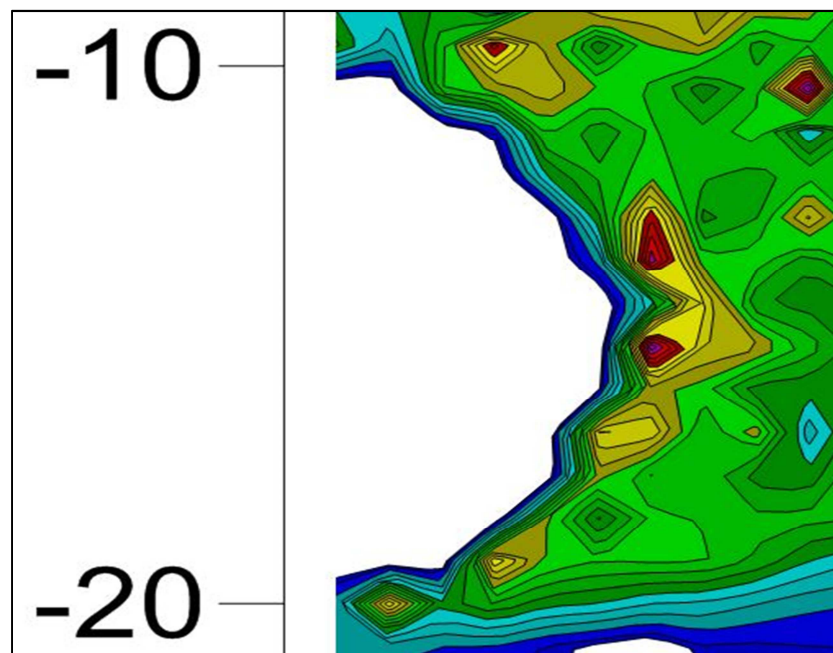


Figura 60. Ampliación de la figura 58

Como podemos ver, en cualquiera de los mapas de Sensibilidad de la presión de agua (figuras 59 y 60), la zona sensible es muy pequeña en comparación a los mapas de sensibilidad de movimientos horizontales y verticales.

Las zonas de sensibilidad coinciden bastante en todos los mapas, dándonos una idea de un mapa modelo donde poder medir la presión de agua en un caso general aunque tengamos el inconveniente de que ésta zona sea muy pequeña.

6.4.6. Sensibilidad de los parámetros Lejos de rotura

Una vez vistos los mapas de sensibilidad cerca de rotura creados con el programa SURFER, cabe mencionar que los mapas lejos de rotura se encuentran en los anejos de este trabajo ordenados correctamente. Los mapas de sensibilidad lejos de rotura también se han tenido en cuenta en el punto 7 del trabajo para poder desarrollar un mapa modelo de medición general tanto en casos de cerca como lejos de rotura.

6.5. Consistencia de los resultados con las matrices de sensibilidad

Numéricamente, se puede demostrar como una variable que se puede medir es sensible a un parámetro y de ésta manera corroborar que la zona sensible del mapa obtenido es cierta y consistente. Como ya se ha mencionado en el punto 2 y punto 3 de éste trabajo, la información importante para el estudio de la sensibilidad se encuentra en la matriz de Sensibilidad. Dicha matriz normalmente no cuadrada de m filas y n columnas, está compuesta por el número de medidas tomadas “m” y el número de parámetros estudiados “n”.

En la matriz de sensibilidad, los números en los que nos debemos fijar para ver si la sensibilidad es consistente con los mapas obtenidos son los números que ésta matriz tiene en su diagonal. Dichos valores se comparan entre sí, viendo como el valor de la matriz de sensibilidad de un parámetro en concreto es superior o inferior respecto al parámetro siguiente estudiado. Teniendo en cuenta el orden de magnitud que haya de diferencia entre dichos valores de la diagonal podemos corroborar como una medida es más sensible a un parámetro u otro, ya que los valores diferirán para el mismo aumento realizado (1.3%) y para las mismas condiciones de desarrollo de cálculo.

Así pues, la matriz de sensibilidad, compuesta por las derivadas parciales de los movimientos en el terreno respecto a cada uno de los parámetros estudiados, tendría un aspecto como el que podemos ver en la siguiente ecuación [6.2]:

$$\begin{pmatrix} \frac{\partial X_1}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial X_n}{\partial P_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial X_m}{\partial P_1} & \dots & \frac{\partial X_m}{\partial P_n} \end{pmatrix} \quad [6.2]$$

Cada columna está compuesta por las derivadas parciales de los movimientos del terreno respecto a un parámetro en concreto. Las filas de la matriz están compuestas por dichos valores de derivadas de los puntos escogidos para en este caso cada uno de los diferentes parámetros estudiados (del P_1 al P_n).

Una vez tenemos estas matrices de sensibilidad, el objetivo es encontrar un número que refleje de manera global el comportamiento sensible del parámetro. El hecho de que normalmente estas matrices no sean cuadradas, dificulta el poder fijarse en la diagonal de la misma, por lo que para encontrar el valor que refleje la sensibilidad del parámetro se recurre a obtener una matriz cuadrada de “n” filas y “n” columnas multiplicando dicha matriz de sensibilidad por su transpuesta.

De manera que la matriz objetivo en la que nos fijaremos será la matriz global de sensibilidad, definida como:

$$A_g = A^T * A \quad [6.3]$$

Donde A_g es una matriz de sensibilidad global donde tendremos toda la información necesaria.

6.5.1. Matrices de Sensibilidad Cerca de Rotura (Modelo Hardening Soil)

Como hemos visto anteriormente, las zonas sensibles coinciden bastante en todos los mapas de sensibilidad obtenidos. Gracias a PLAXIS, podemos escoger puntos de la malla de Elementos Finitos cuyos valores reflejan bien la alta sensibilidad respecto a cada uno de los parámetros. En las siguientes figuras 61 y 62 se muestran las zonas de la geometría de donde se han extraído los puntos óptimos mostrados en las tablas 4 y 5 para demostrar la consistencia de los mapas.

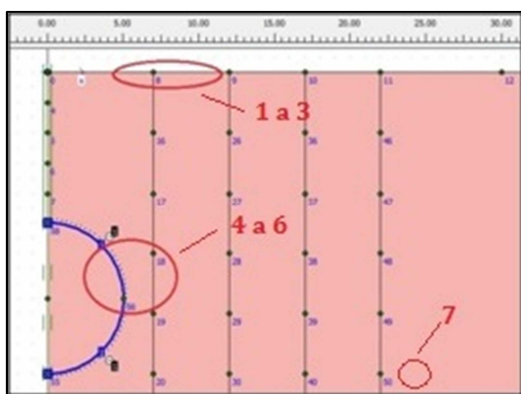


Figura 61. Zonas Sensibles en X

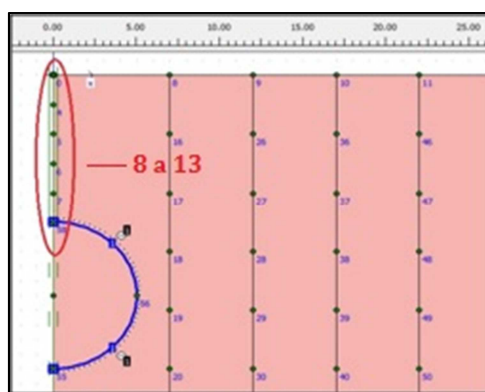


Figura 62. Zonas Sensibles en Y

También se han introducido un par de puntos fuera de las zonas sensibles para que se pueda ver la diferencia en el valor entre un punto escogido en la zona óptimo y otro fuera de la zona óptima.

id	Nodos	Cohesión	Phi	Ko	E50	Eur
1	9796	0.003564408	0.002535712	-0.019334	1.56534E-06	3.90352E-07
2	7508	0.004479385	0.00281161	-0.01210157	1.81642E-06	3.5601E-07
3	8755	0.004358569	0.00287506	-0.01528743	1.80554E-06	3.98079E-07
4	4305	0.001775715	0.002733725	-0.04338014	1.27521E-06	6.67995E-07
5	6560	0.002571454	0.002093871	-0.01635343	1.09667E-06	3.65386E-07
6	6956	0.000197293	4.33581E-05	-0.00155756	7.07098E-08	1.79269E-08
7	16224	0.000359473	0.000103807	-0.00328854	1.66559E-07	3.82175E-08

Tabla 4. Matriz de Sensibilidad en X para el aumento de 1.3%

<i>id</i>	<i>Nodos</i>	<i>Cohesión</i>	<i>Phi</i>	<i>Ko</i>	<i>E50</i>	<i>Eur</i>
8	6457	0.006093508	0.005575484	-0.009529	2.96443E-06	7.4507E-07
9	5748	0.009324415	0.007528225	-0.02898243	4.24611E-06	1.00963E-06
10	5612	0.009996423	0.007827217	-0.03611443	4.50585E-06	1.10658E-06
11	5596	0.0105947	0.008057681	-0.04174757	4.75809E-06	1.18735E-06
12	3536	0.0115721	0.008738668	-0.05662771	5.11526E-06	1.38483E-06
13	6956	-0.00014901	-3.0252E-05	0.000723363	-3.2312E-08	-6.8861E-09
7	16224	-8.3568E-05	-8.3346E-06	0.000387067	3.19106E-08	5.41726E-09

Tabla 5. Matriz de Sensibilidad en Y para el aumento de 1.3%

Como podemos observar, los dos últimos números de las matrices de sensibilidad locales son puntos situados lejos del túnel así como de la zona sensible obtenida en los mapas. Se puede ver como los valores de éstos nodos en cada uno de los parámetros son bastante más pequeños que el resto, es decir, son menos sensibles ya que no se han extraído de una zona óptima de medición. A continuación se muestran en las tablas 6 y 7 las Matrices de Sensibilidad global para el caso que hemos estado presentando desde el principio, el de cerca de rotura.

<i>Cohesión</i>	<i>Phi</i>	<i>Ko</i>	<i>E50</i>	<i>Eur</i>
6.17007E-05	4.44482E-05	-0.000310325	2.67438E-08	6.86415E-09
4.44482E-05	3.44712E-05	-0.000280243	2.00701E-08	5.73121E-09
-0.00031033	-0.00028024	0.002916469	-1.53759E-07	-5.30476E-08
2.67438E-08	2.00701E-08	-1.53759E-07	1.18712E-11	3.23662E-12
6.86415E-09	5.73121E-09	-5.30476E-08	3.23662E-12	1.01909E-12

Tabla 6. Matriz de Sensibilidad global en X Cerca de rotura (1.3%)

<i>Cohesión</i>	<i>Phi</i>	<i>Ko</i>	<i>E50</i>	<i>Eur</i>
0.000470194	0.000368913	-0.001787069	2.12306E-07	5.36217E-08
0.000368913	0.000290317	-0.001385255	1.66803E-07	4.20853E-08
-0.00178707	-0.00138526	0.007185266	-8.02352E-07	-2.04316E-07
2.12306E-07	1.66803E-07	-8.02352E-07	9.59274E-11	2.42155E-11
5.36217E-08	4.20853E-08	-2.04316E-07	2.42155E-11	6.12663E-12

Tabla 7. Matriz de Sensibilidad global en Y cerca de rotura (1.3%)

En las matrices de sensibilidad podemos ver como la sensibilidad en las medidas horizontales (X) es menor que en la de las medidas verticales (Y). Cuesta más apreciar valores altos aunque hagamos el estudio con puntos de las zonas de la geometría más óptimas. Por normal general, se cumple que los valores de los parámetros de rotura (Cohesión i Phi) tienen valores más altos que los parámetros deformacionales (E_{50} y E_{ur}) por lo que tiene lógica estando en el caso de cerca de rotura. En el caso de Ko se ve

que el valor es bastante alto respecto a los demás dado que es un estudio de sensibilidad horizontal y eso concuerda con el ratio que define el coeficiente de empuje al reposo.

En cambio podemos ver en la matriz de sensibilidad en Y, como los primeros tres valores (Cohesión, Φ y K_0) tienen valores similares (tabla 7), dato que demuestra y corrobora la sensibilidad obtenida en los mapas mostrados anteriormente, ya que todos tienen una sensibilidad notable en los movimientos verticales y casi siempre en la misma zona de la geometría, cosa que facilita la obtención de puntos óptimos. Lo contrario ocurre, en el caso de movimientos horizontales, las zonas sensibles son más pequeñas y es más difícil de obtener numéricamente un valor consistente si no se cogen valores dentro de la zona óptima. Los valores escogidos en este caso, son valores que quedan dentro y alrededor de las zonas sensibles, ya que la mayoría de los puntos escogidos para las matrices de sensibilidad son puntos colocados a priori estratégicamente cerca de la envolvente del túnel.

6.6. Efecto del estudio de la Sensibilidad sobre la pérdida de volumen en el túnel

Fijándonos en los mapas de sensibilidad vertical para todos los parámetros, todos han coincidido con la zona de mayor sensibilidad posicionándola justo encima del túnel, donde aparentemente el asiento suele ser mayor. Gracias a instrumentos nombrados en el punto 2 de este trabajo como los extensómetros, podemos medir la evolución del desplazamiento vertical o asiento del terreno a medida que la construcción del túnel va avanzando.

Observando la evolución de los movimientos verticales que se producen, podemos anticipar también medidas de seguridad en el caso de que éstos sean o se pueden predecir como inadmisibles, tomando así las medidas necesarias para controlar el problema.

Dada la evolución porcentual que hemos estudiado para el caso de la sensibilidad se mostrarán como afecta este aumento porcentual a la cubeta de asientos producida por la construcción del túnel en cada uno de los parámetros estudiados. De esta manera también se pueden sacar conclusiones como con cual parámetro se tendrá que ir con más cuidado a la hora de hacer mediciones durante la construcción, medidas preventivas en caso de riesgo, etc. y con qué parámetros hay más margen de error.

En las siguientes figuras y tablas se muestran los gráficos de la cubeta de asiento por defecto sin ningún tipo de aumento seguido de la figura que nos compara cada una de las cubetas de asientos producidas en cada parámetro por el incremento porcentual del 1.3% con el que se ha estudiado el caso de la sensibilidad.

También se muestran las tablas correspondientes a la comparativa de la pérdida de volumen calculada en Excel mostrando así resultados para posteriormente definir las medidas correspondientes en el caso de que las deformaciones verticales no fuesen o no estuvieran dentro de las deformaciones tolerables.

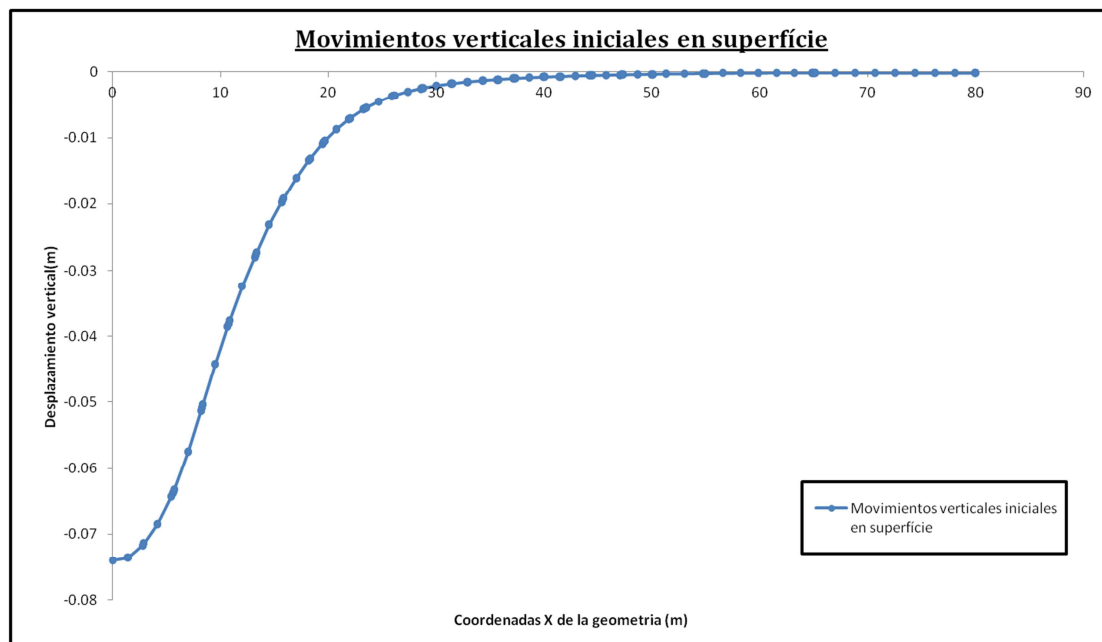


Figura 63. Asiento en Superficie de referencia con la escala vertical exagerada (0.08m max)

En la figura 63 podemos ver cuál sería el asiento en superficie en nuestro caso de la construcción del túnel sin ningún tipo de aumento porcentual en ninguno de los parámetros, todos los parámetros tendrían su valor por defecto.

En la siguiente tabla 8 podemos observar cuál sería la pérdida de volumen del túnel en su construcción así como el volumen final de éste con los valores iniciales de los parámetros.

	GEOMETRIA PLAXIS (1/2)	REAL
SUPERFICIE INICIAL DEL TÚNEL (m ²)	39.2699	78.5398
SUPERFICIO DEL ASIENTO EN EL TERRENO (m ²)	-0.924726367	-1.849452734
SUPERFICIE FINAL DEL TÚNEL (m ²)	38.34517363	76.69034727
PÉRDIDA DE VOLUMEN TOTAL EN EL TÚNEL (%)	2.355%	2.355%

Tabla 8. Datos de la superficie final y pérdida de volumen del túnel con los parámetros por defecto

En la figura 64 podemos ver cuál es la diferencia en el asiento producido por la construcción del túnel en cada uno de los parámetros con un aumento porcentual del 1.3% respecto al valor inicial de cada uno.

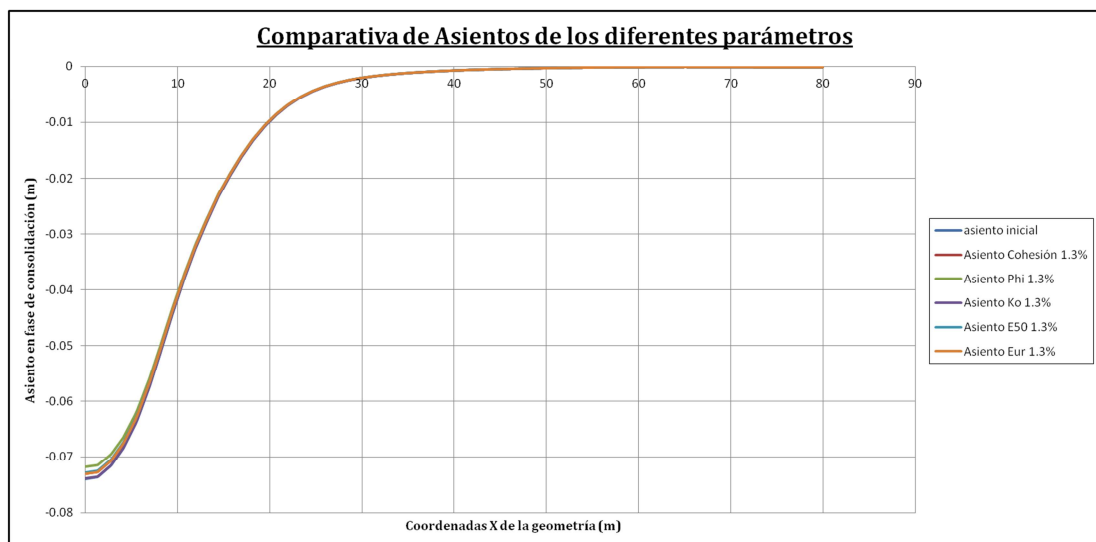


Figura 64. Comparativa de los asientos de cada parámetro con aumento del 1.3% respecto al asiento inicial

Dado que el incremento usado del 1.3% está cerca del valor inicial por defecto, es difícil apreciar algunos asientos ya que éste es casi el mismo para algunos parámetros como en el caso de K_0 y el asiento inicial. Se puede ver como el asiento obtenido con el cambio del parámetro Phi sería el más pequeño producido para el mismo aumento porcentual, seguido del Asiento de E_{50} , el de E_{ur} posteriormente, el asiento de Cohesión hasta llegar al asiento de K_0 y el inicial dónde estos dos darían casi el mismo resultado, quedando el asiento de K_0 solo un poco por encima.

En la siguiente tabla 9 se puede ver la evolución numérica de la pérdida de volumen en cada uno de los parámetros con el aumento porcentual del 1.3% usado en el trabajo.

PARÁMETROS		SUPERFICIE TÚNEL (m2)	SUPERFICIE FINAL TÚNEL (m2)	PÉRDIDA DE VOLUMEN (%)	Δ VOLUMEN
Valor Inicial	0%	78.540	76.690	2.355%	0.000%
Cohesión	1.3%	78.540	76.695	2.349%	0.006%
Phi	1.3%	78.540	76.737	2.296%	0.059%
Ko	1.3%	78.540	76.691	2.354%	0.001%
E50	1.3%	78.540	76.718	2.320%	0.035%
Eur	1.3%	78.540	76.714	2.324%	0.031%

Tabla 9. Valores de la pérdida de volumen con cada uno de los parámetros estudiados en el rango óptimo

En la siguiente figura 65 podemos ver gráficamente como es esta evolución en el rango óptimo de cálculo de la derivada. Se muestra también una prolongación de la pérdida de volumen hasta un aumento del 2% respecto al valor inicial de cada parámetro para que visualmente pueda verse bien dicha proyección de cambio de volumen ya que con 3 datos es un poco difícil observar con claridad cuál es la proyección que sigue cada parámetro.

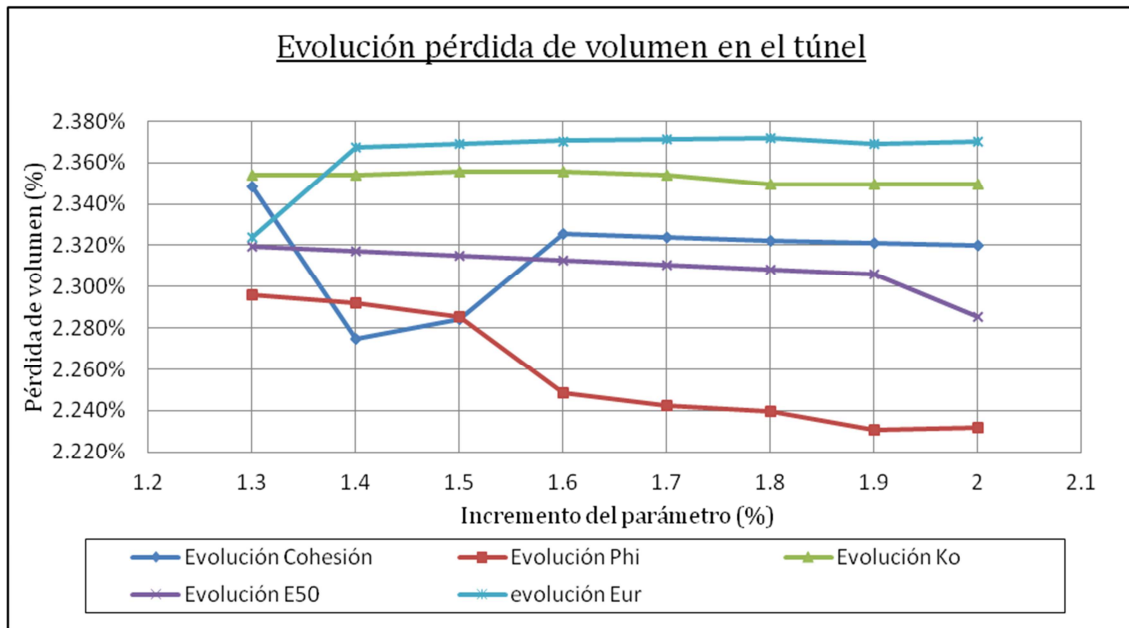


Figura 65. Evolución de la pérdida de volumen en el túnel para todos los parámetros estudiados

6.7. Tendencias de los mapas de sensibilidad para otras geometrías

Para ver si hay algún tipo de tendencia sobre las zonas de sensibilidad, se han estudiado otros dos tipos de geometría en el caso cerca de rotura con las mismas condiciones litológicas y también respecto a los cambios porcentuales de valores sobre los diferentes parámetros mencionados anteriormente. La primera geometría se ha definido con el túnel a una profundidad de 5m y la segunda con el túnel a una profundidad de 20m.

Según estos dos casos, obtenemos que para cuando el túnel está más cerca de la superficie, para los movimientos horizontales, las zonas sensibles se mantienen tanto en la parte superior como alrededor del túnel aunque estas están un poco más juntas al eje de simetría del túnel, es decir, siguen una disposición como las de la figura 61 pero la localización asciende al mismo tiempo que el túnel ascienda hacia superficie también.

Para el caso de los movimientos verticales, igualmente, se mantienen en el mismo eje de simetría del túnel aunque la zona sensible es un poco más pequeña que para el caso del túnel a 10m de profundidad.

Para el caso del túnel localizado a 20m de profundidad, obtenemos que en el caso de la sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto a los parámetros, la zona sensible alrededor del túnel sigue manteniéndose y en cambio la zona localizada en

superficie es más débil además de localizarse más hacia la derecha de la geometría (entre los 10 y 20 m en superficie).

Para el caso de la sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto de los parámetros, las zonas sensibles se mantienen en el eje vertical de simetría del túnel como se muestra en la figura 62, siendo estas un poco más extensas, localizadas desde la parte de justo encima del túnel hasta la superficie.

7. Conclusiones

7.1. Sensibilidad de los movimientos respecto a los parámetros

Como se menciona en el título del trabajo, se ha intentado encontrar una manera más eficiente de llevar a cabo el despliegue de una instrumentación geotécnica en túneles. Para ello hemos generado mapas de sensibilidad de variables de medidas respecto a parámetros tipo del problema geotécnico asociado. Dado el caso base escogido, hemos obtenido resultados muy positivos ya que los mapas de sensibilidad son bastante nítidos y muestran zonas de máxima sensibilidad bastante amplias donde poder hacer mediciones. No olvidemos que el objetivo de la optimización de la instrumentación es un paso previo fundamental para un estudio retrospectivo en túneles o” *backanalysis*”. Como se expuso en el punto 2 de éste trabajo, la obtención de valores de parámetros del terreno con la mayor fiabilidad posible es básica para una buena predicción del comportamiento en fases futuras, ya que como se ha mencionado anteriormente, esa es la función del análisis retrospectivo.

Así pues, la pregunta que nos deberíamos responder en este trabajo, después de todo el estudio realizado sería: donde deberíamos posicionar nuestra instrumentación geotécnica para obtener el mejor valor del parámetro geotécnico deseado? Gracias al estudio de sensibilidad, ésta pregunta puede ser respondida con total seguridad y consistencia, ya que no solo tenemos los mapas para cada uno de los parámetros geotécnicos sino que además todos ellos siguen un mismo patrón de sensibilidad para el aumento óptimo, por lo que somos capaces de delimitar una zona óptima de medición válida para todos ellos.

Dado que podemos obtener el valor de un parámetro a partir tanto de los movimientos horizontales (X) como de los movimientos verticales (Y), podemos observar en los mapas de sensibilidad obtenidos que la nitidez es más clara en los movimientos verticales que en los horizontales, ya que se producen movimientos más importantes en el eje Y que en el X. Por norma general la intuición siempre ha llevado a posicionar instrumentación geotécnica encima del eje simétrico del túnel, ya que es donde los movimientos verticales son más acentuados (cubeta de asientos). Esa regla intuitiva se corrobora en este trabajo con datos extraídos a partir del software PLAXIS como también se corroboran otras zonas claves no conocidas anteriormente dentro de la

geometría como por ejemplo se ha podido comprobar en los mapas de sensibilidad horizontal entre los 5m y 10m respecto al eje vertical túnel.

Así pues, se ha podido extraer la siguiente información a partir de los mapas de sensibilidad realizados.

Para los movimientos Horizontales (X) se han delimitado 3 zonas (zonas de color rojo que se muestran en las figuras 66 y 67) donde se puede obtener el valor de cada uno de los parámetros estudiados. Se ha intentado agrupar el mayor número de parámetros en la región más pequeña posible dentro del terreno, aunque para el caso X ha sido un poco más complicado dados los diferentes movimientos que la construcción del túnel produce en la geometría. La zona de color rojo justo encima de la envolvente del túnel es muy sensible a los parámetros E_{50} , E_{ur} , Cohesión y Φ . Es la zona con mayor abarque de parámetros dado que el único parámetro que falta es K_0 . En el caso de éste último, la única zona sensible al valor de K_0 sería la zona circular de color rojo justo debajo de la mencionada ya anteriormente. Por último existe otra zona de máxima sensibilidad para los parámetros E_{50} y Cohesión localizada en superficie entre los 4m y los 11m aproximadamente desde el eje simétrico del túnel.

En el caso de los movimientos verticales (Y), se han delimitado dos zonas tipo, ya que casi todos son muy coincidentes en cuanto a zona sensible dentro de la geometría creada. La zona justo encima del eje de simetría del túnel de color morado (como se puede ver en las figuras 66 y 67) es una zona donde coincide la sensibilidad de 4 de los 5 parámetros (Cohesión, E_{50} , K_0 y Φ). Para el parámetro E_{ur} , tendríamos la otra zona morado un poco más a la derecha del eje de simetría del túnel, una zona donde solo éste parámetro aparece como sensible en los movimientos verticales. Ésta zona se encuentra entre los 2.5m y los 6m longitudinalmente y se encuentra entre los -2m y -12m verticalmente.

Habiendo hecho este estudio con los mapas de sensibilidad obtenidos de PLAXIS, podemos crear un mapa modelo genérico, para la geometría formada por arcilla no drenada que tenemos en nuestro caso e incluso extrapolable a geometrías con una formación parecida a la utilizada en este trabajo (geometrías con una sola litología, valores parecidos en parámetros geotécnicos, etc.). Como se ha mencionado anteriormente, las zonas que se ven en las figuras 66 y 67 con un color rojo, delimitan zonas de medición óptima extraídas a partir de los movimientos Horizontales (X) y las zonas con un color púrpura delimitan zonas de medición óptima extraídas a partir de movimientos verticales (Y).

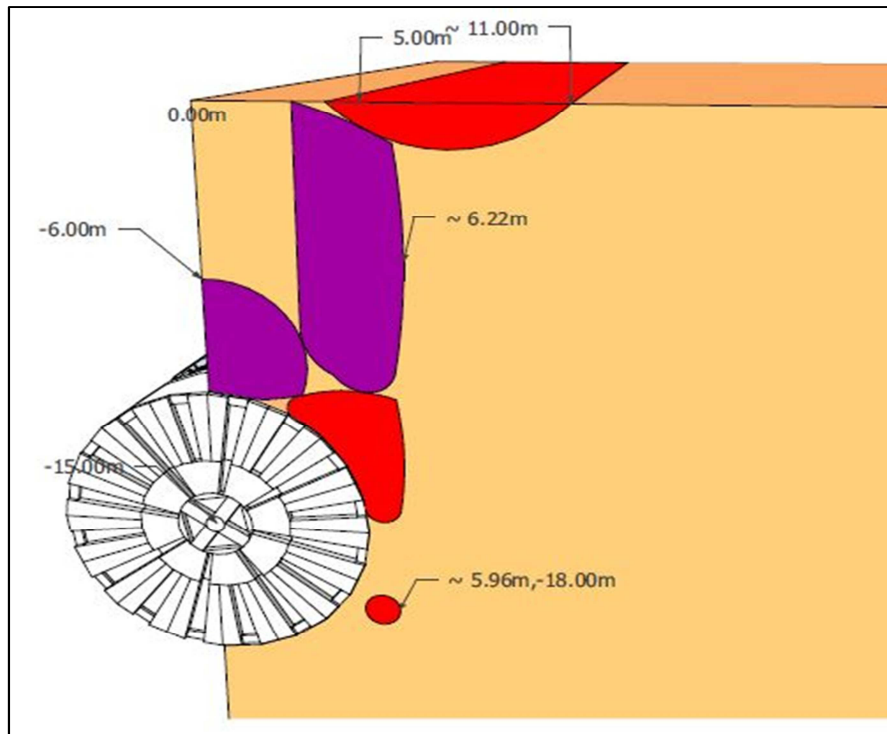


Figura 66. Mapa modelo de medición para la optimización de la instrumentación geotécnica

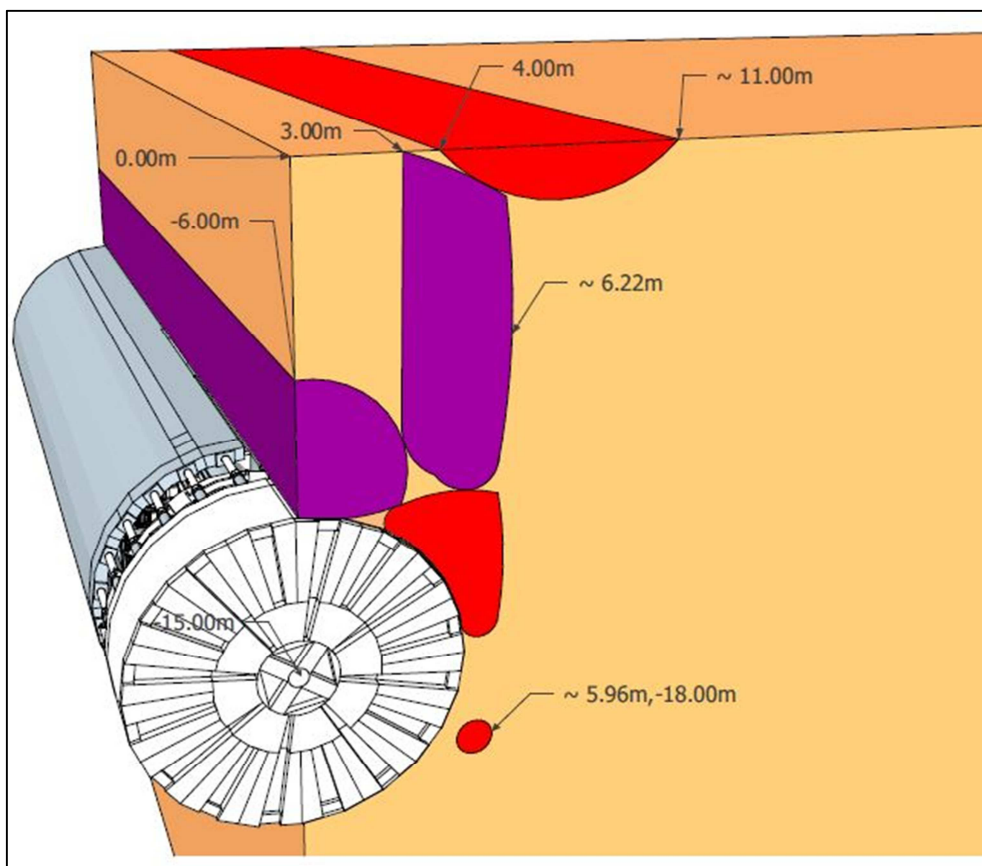


Figura 67. Visualización en 3D del mapa modelo de medición

7.2. Sensibilidad de la presión de agua respecto a los parámetros

Para el caso de la presión de agua, hacer un mapa de modelo de medición ha sido más difícil dado que las zonas sensibles obtenidas son muy pequeñas en comparación con la de movimientos horizontales y verticales mostradas anteriormente. La variación de la presión de agua para cada uno de los parámetros es una zona muy concreta para el caso de cerca de rotura, lo que dificulta hacer un mapa modelo general aunque se han obtenido ciertas coincidencias en 3 de los 5 parámetros estudiados. Aun así se ha procedido a crear un mapa de medición delimitando cuál sería la zona de medición dentro de la geometría para obtener valores representativos de la presión de agua respecto a los diferentes parámetros mencionados ya anteriormente. A continuación, en la figura 68 podemos ver dicho mapa.

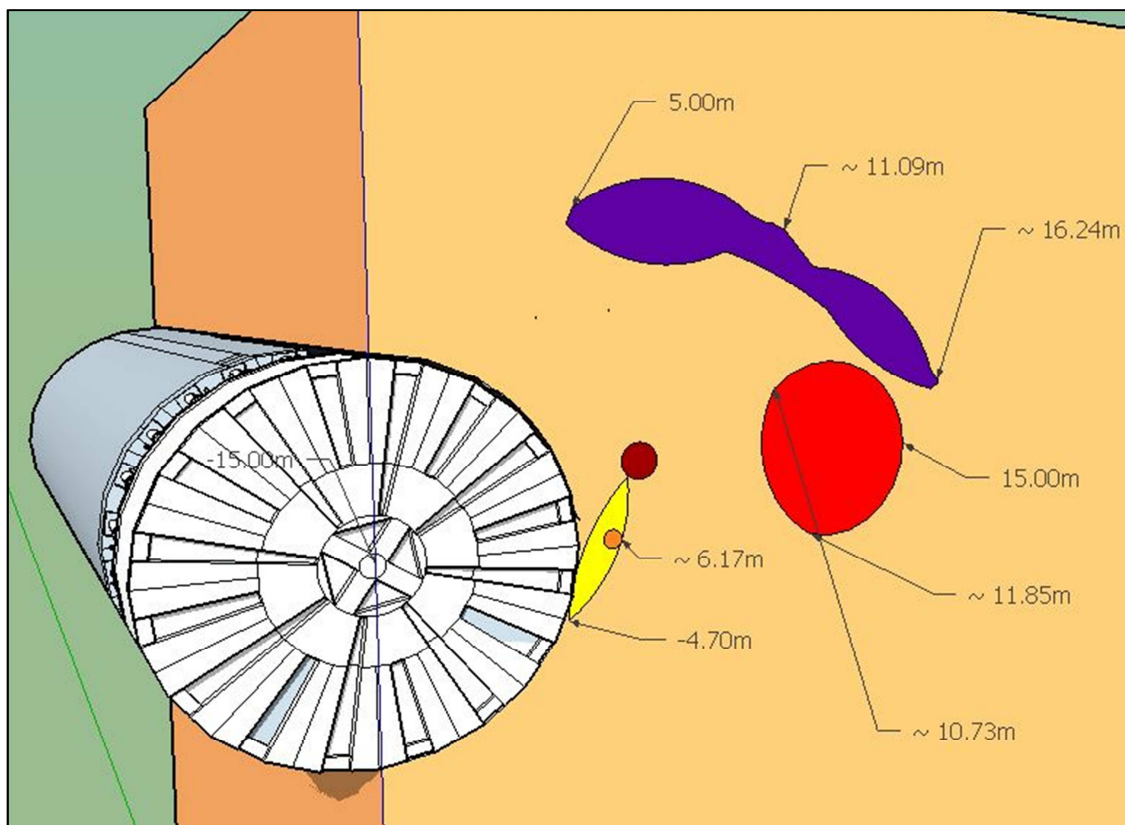


Figura 68. mapa modelo de medición para obtener valores representativos de la presión de agua

Como se puede observar en la figura 68, el mapa general de medición contiene unas zonas sensibles más pequeñas en el caso cerca de rotura que para la sensibilidad de los movimientos horizontales y verticales vistos anteriormente. Así pues, este mapa delimita 3 regiones de medición. En la región granate, encontramos la región de medición de la presión de agua respecto al parámetro K_0 , que se extiende

horizontalmente desde la coordenada X 6.2m hasta los 7.2m. la coordenada Y se mantendría constante en los -13m.

Siguiendo con la otra región en forma de círculo de color naranja, encontraríamos la coincidencia de la presión de agua respecto a 4 parámetros (Cohesión, E_{50} , E_{ur} , Φ). La región se extiende de los 5.44m hasta los 5.9m en el eje X (como vemos es una región bastante más pequeña a cualquier otra obtenida antes) y la coordenada Y se mantendría estable en los -15m.

La región amarilla es exclusivamente para mediciones de la presión de agua respecto al parámetro Φ . Esta zona es un poco más extensa abarcando de los 4.7m a los 6.4m horizontalmente y de los -13.4 a los -17m en el eje vertical.

Para el caso de lejos de rotura, vemos que son zonas más extensas que en el caso cerca de rotura, delimitando bien una zona bastante amplia donde poder hacer mediciones. En la zona de color roja, encontraríamos la zona de medición de los parámetros de rotura (Cohesión i Φ) que coinciden ya que la presión de agua es sensible a estos parámetros entre las coordenadas 5m y 10m del eje X y las coordenadas -7m y -13m aproximadamente en el eje vertical.

Finalmente, tenemos la zona de medición óptima de color morado, zona donde podemos obtener valores representativos de la presión de agua respecto a los parámetros donde encontramos K_0 , E_{50} y E_{ur} . Como vemos, es una zona más extensa que incluso la anterior de color roja, extendiéndose desde los 5m hasta los 16.4m en el eje longitudinal (X) aproximadamente, y desde los -8.4m hasta los -11.3m en la dirección vertical del eje Y.

Como podemos observar según los mapas de medición, la precisión para obtener valores representativos de los diferentes parámetros a partir de los movimientos del terreno y valores representativos de la presión de agua existente, es bastante diferente. En los mapas de movimientos en el terreno, la precisión con la que se puede trabajar puede ser más baja, ya que las regiones óptimas de medición son más extensas. Por el contrario, la precisión con la que se deberían que hacer las mediciones para la presión de agua en el caso de cerca de rotura sería muy alta, en comparación con los ya nombrados y el caso de lejos de rotura.

7.3. Líneas futuras de investigación

El trabajo desarrollado se ha centrado en analizar una geometría con unos parámetros tipo, denominado caso base. La sensibilidad de las variables medidas (desplazamientos y presión de agua) respecto a los parámetros del modelo “Hardening Soil Model” se ha determinado para dicho caso base. Se sabe que dicha sensibilidad depende de la geometría y del rango de los parámetros, de manera que para otras situaciones puede haber cambios en la magnitud de dicha sensibilidad. Por tanto, una extensión obvia de este trabajo se podría establecer en los siguientes términos:

- Determinación de las sensibilidades para otras geometrías, algo explorado en el apartado 6.7 y para otro rango de los parámetros.
- Estudio de otros casos con diferente litología en la geometría diseñada (ya sea una litología homogénea o varias litologías existentes).
- Estudio de la zona óptima de medición colocando niveles freáticos a diferente profundidad en la geometría prediseñada.
- Uso de otros modelos constitutivos, que pueden hacer que cambien la sensibilidades al cambiar los parámetros.

La gran variabilidad de geometrías, modelos y rangos de parámetros hace que esta labor sea ardua, pero en todo caso, ayudará a tener pautas de colocación de la instrumentación geotécnica.

8. Referencias Bibliográficas

- [1] **Brinkgreve, R.B.J. (2002).** Plaxis, 2D – version 8.0. Delft University of Technology & Plaxis b.v., The Netherlands.
- [2] **Gens, A., Ledesma, A. (2000).** Análisis inverso e identificación de parámetros en Geotecnia. Libro Homenaje a J.A. Jiménez Salas, “Geotecnia en el año 2000. CEDEX, Ministerio de Fomento, Madrid
- [3] **Haftka, RT., Scott, EP., Cruz, JR. (1998).** Optimizazion and experiments: A survey, apple Mech Rev vol 51, no 7, July 1998, 435-448.
- [4] **Jáky, J. (1944).** “A nyugalmi nyomâs tényezője (The coefficient of earth pressure at rest)” Magyar Mérnök és Építész Egylet Közlönye (Journal for Society of Hungarian Architects and Engineers), October, pp. 355-358.
- [5] **Ledesma, A. (2003).** Análisis retrospectivos sistemáticos durante la excavación de túneles en: Jornadas Hispano-Lusas sobre obras subterráneas. Relevancia de la prospección y observación geotécnica, Madrid 15-16 Septiembre 2003,CEDEX-Madrid, 441-448.
- [6] **Murakami, A., Hasegawa, T. (1988).** Back analysis Kalman filter-finite elements and optimal location of observed points in Numerical Methods in Geomechanics (Innsbruck 1988), Swoboda (ed.), Balkema, Rotterdam, 2051-2058.
- [7] **Prat. P. (2006).** Ecuaciones Constitutivas ELASTICIDAD y PLASTICIDAD, Apuntes de clase, Barcelona, noviembre 2006.
Enlace: https://portal.camins.upc.edu/materials_guia/250131/2012/Elasticitat-Plasticitat.pdf.
- [8] **Terzaghi, K., Peck, R. (1967).** Soil Mechanics in Engineering Practice, Wielely and sons, inc., New York, 1967.

Referencias del Manual de Plaxis

- [9] **Bolton, M.D., (1986).** The Strength and Dilatancy of Sands. Géotechnique, Vol. 36, No. 1, pp. 65-78.
- [10] **Duncan, J.M., Chang, C.-Y., (1970).** Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soil. ASCE J. of the Soil Mech. And Found. Div. Vol. 96, pp. 1629-1653.
- [11] **Janbu, J., (1963).** Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Tests. Proc. ECSMFE Wiesbaden, Vol. 1, pp. 19-25.

- [12] **Koiter, W.T., (1960).** General Theorems for Elastic-Plastic Solids. In: Progress in Solid Mechanics (eds. I.N. Sneddon, R. Hill), Vol. 1., North-Holland, Amsterdam, pp. 165-221.
- [13] **Kondner, R.L., (1963).** A Hyperbolic Stress Strain Formulation for Sands. 2. Pan. Am. ICOSFE Brazil, Vol. 1, pp. 289-324.
- [14] **Rowe, P.W., (1962).** The Stress-Dilatancy Relation for Static Equilibrium of an Assembly of Particles in Contact. Proc. Roy. Soc.A., No. 269, pp. 500-527.
- [15] **Schanz, T., (1998).** Zur Modellierung des Mechanischen Verhaltens von Reibungsmaterialien, Habilitation, Stuttgart Universität.
- [16] **Schanz, T., Vermeer, P.A., (1996).** Angles of Friction and Dilatancy of Sand. Géotechnique 46, pp. 145-151.
- [17] **Schanz, T., Vermeer, P.A., Bonnier, P.G., (1999).** Formulation and verification of the Hardening-Soil Model. In: R.B.J. Brinkgreve, Beyond 2000 in Computational Geotechnics. Balkema, Rotterdam: 281-290.
- [18] **Smith, I.M., Griffith, D.V., (1982).** Programming the Finite Element Method, Second Edition. John Wiley & Sons, Chisester, U.K.
- [19] **Vermeer, P.A., de Borst, R., (1984).** Non-Associated Plasticity for Soils, Concrete and Rock. Heron, Vol 29. No. 3.
- [20] **Vermeer, P.A., van Langen, H., (1989).** Soil collapse computations with finite elements. Ingenieur-Archiv 59: 221-236.

Otras referencias Consultadas

- [21] Ingeniería de Túneles, Tunnel Engineering, Aula Paymacotas. Información obtenida en Abril, 2016.
Enlace: www.etcg.upc.edu/estudis/aula-paymacotas
- [22] Instrumentación de túneles y Excavaciones, Jornada Técnica 21/10/2010, Barcelona. Información obtenida en Abril, 2016.
Enlace: www.etcg.upc.edu/estudis/aula-paymacotas

9. Anejos

En este apartado de anejos se encuentran los mapas obtenidos con el modelo Hardening Soil tanto cerca como lejos de rotura para los movimientos del terreno respecto a cada uno de los parámetros estudiados así como los mapas de la sensibilidad de la presión de agua respecto dicho parámetros.

Los primeros mapas en mostrarse son los mapas obtenidos para el caso cerca de rotura, mapas que se identifican con las siglas “CC” en el pie de ilustración. Los mapas que muestran las siglas “LC” son los mapas obtenidos para el caso lejos de rotura.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES DE LOS ANEJOS

<i>Ilustración 1. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) – CC.....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 2. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) – CC.....</i>	<i>104</i>
<i>Ilustración 3. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Phi (1.3%) – CC.....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 4. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Phi (1.3%) – CC.....</i>	<i>105</i>
<i>Ilustración 5. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Ko (1.3%) – CC.....</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 6. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Ko (1.3%) – CC.....</i>	<i>106</i>
<i>Ilustración 7. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro E50 (1.3%) – CC.....</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 8. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro E50 (1.3%) – CC.....</i>	<i>107</i>
<i>Ilustración 9. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Eur (1.3%) – CC.....</i>	<i>108</i>
<i>Ilustración 10. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Eur (1.3%) – CC.....</i>	<i>108</i>
<i>Ilustración 11. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Cohesión (1.3%) – CC.....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 12. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Phi (1.3%) – CC.....</i>	<i>109</i>
<i>Ilustración 13. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Ko (1.3%) – CC.....</i>	<i>110</i>
<i>Ilustración 14. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro E50 (1.3%) – CC.....</i>	<i>110</i>
<i>Ilustración 15. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Eur (1.3%) – CC.....</i>	<i>111</i>
<i>Ilustración 16. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) – LC.....</i>	<i>112</i>
<i>Ilustración 17. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) -LC.....</i>	<i>112</i>

<i>Ilustración 18. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Φ (1.3%) – LC.....</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 19. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Φ (1.3%) – LC.....</i>	<i>113</i>
<i>Ilustración 20. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro K_0 (1.3%) – LC.....</i>	<i>114</i>
<i>Ilustración 21. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro K_0 (1.3%) – LC.....</i>	<i>114</i>
<i>Ilustración 22. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro E_{50} (1.3%) – LC.....</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 23. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro E_{50} (1.3%) – LC.....</i>	<i>115</i>
<i>Ilustración 24. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro E_{ur} (1.3%) – LC.....</i>	<i>116</i>
<i>Ilustración 25. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro E_{ur} (1.3%) – LC.....</i>	<i>116</i>
<i>Ilustración 26. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Cohesión (1.3%) – LC.....</i>	<i>174</i>
<i>Ilustración 27. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Φ (1.3%) – LC.....</i>	<i>117</i>
<i>Ilustración 28. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro K_0 (1.3%) – LC.....</i>	<i>118</i>
<i>Ilustración 29. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro E_{50} (1.3%) – LC.....</i>	<i>118</i>
<i>Ilustración 30. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro E_{ur} (1.3%) – LC.....</i>	<i>119</i>

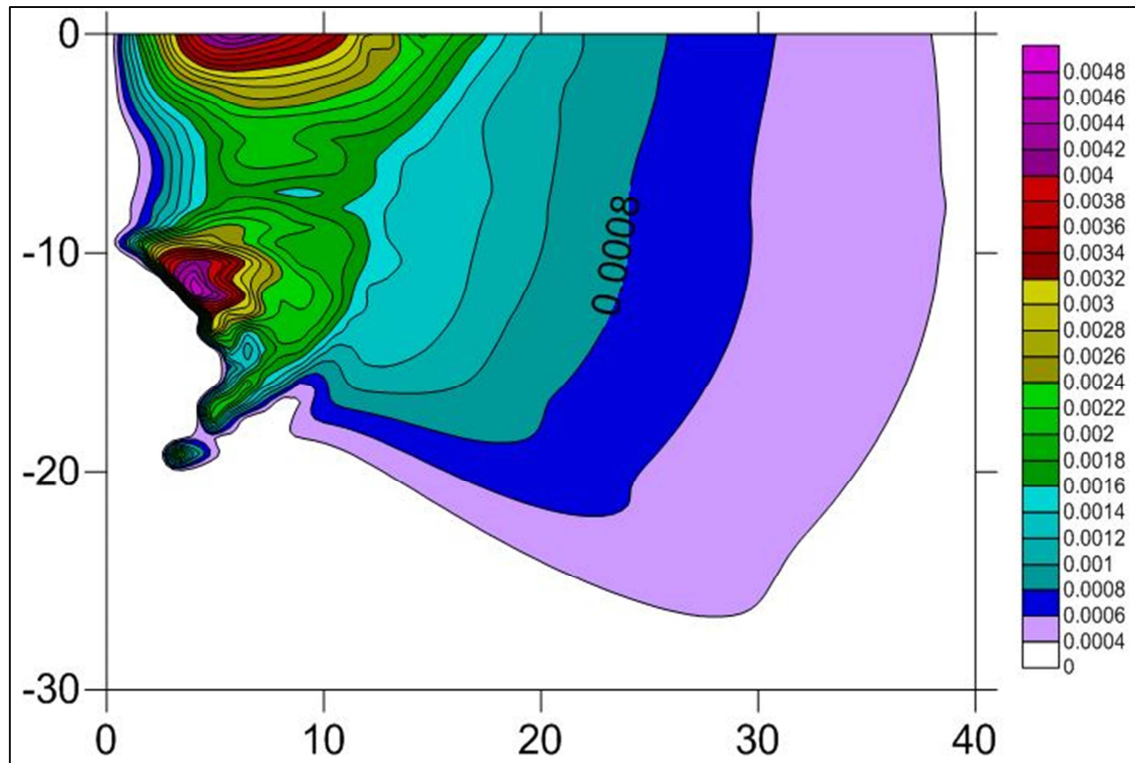


Ilustración 1. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) - CC

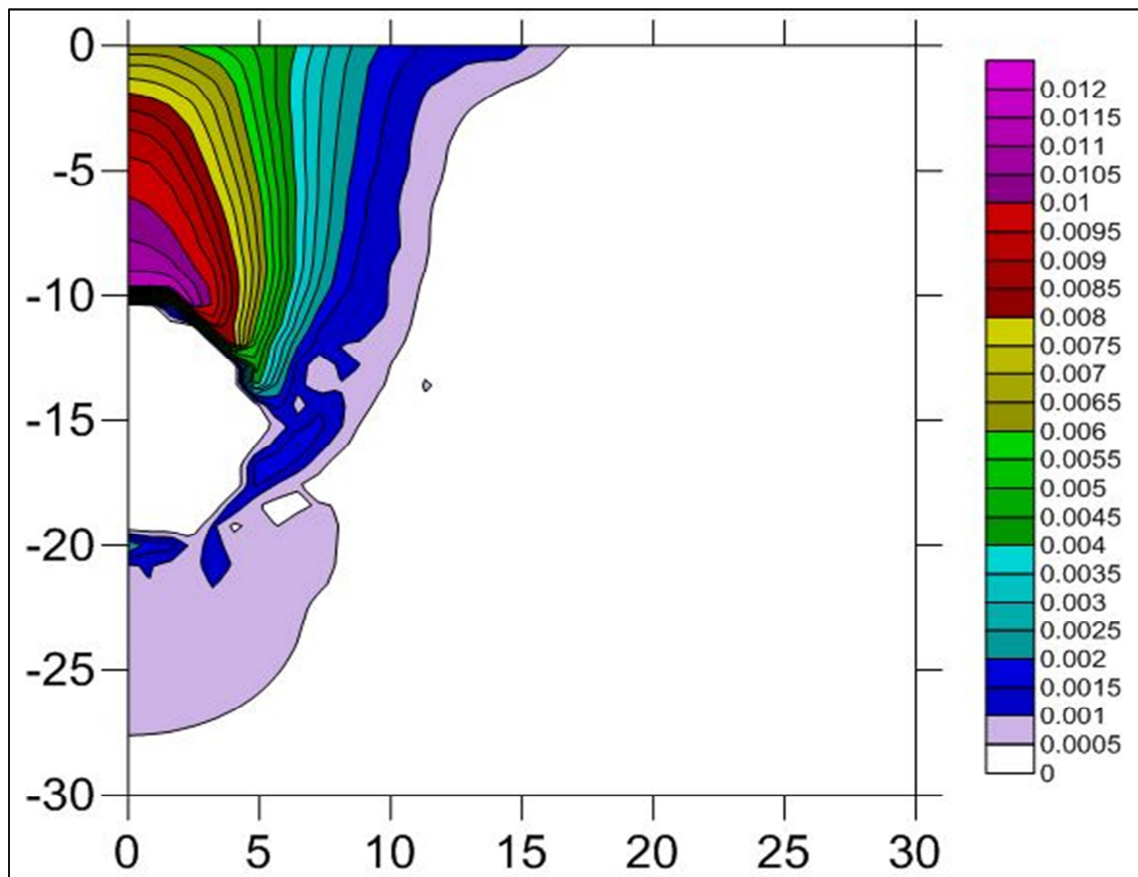


Ilustración 2. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) - CC

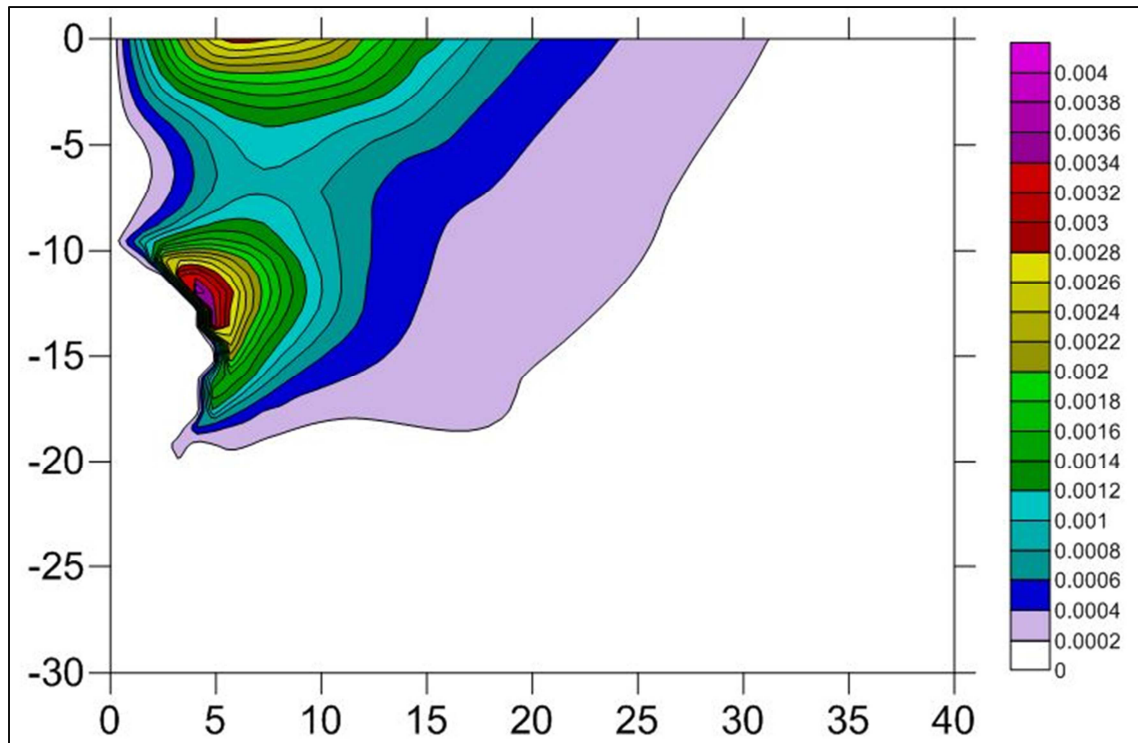


Ilustración 3. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Φ (1.3%) - CC

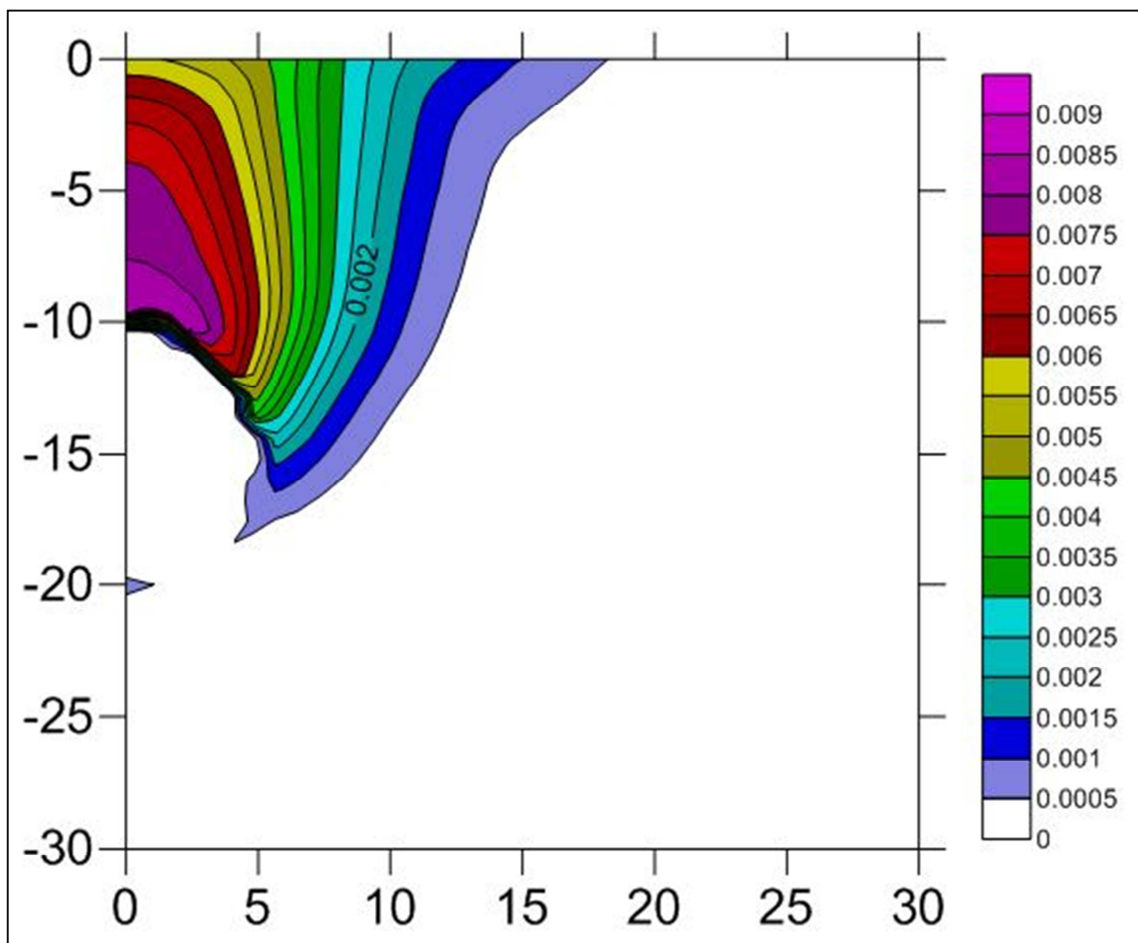


Ilustración 4. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Φ (1.3%) - CC

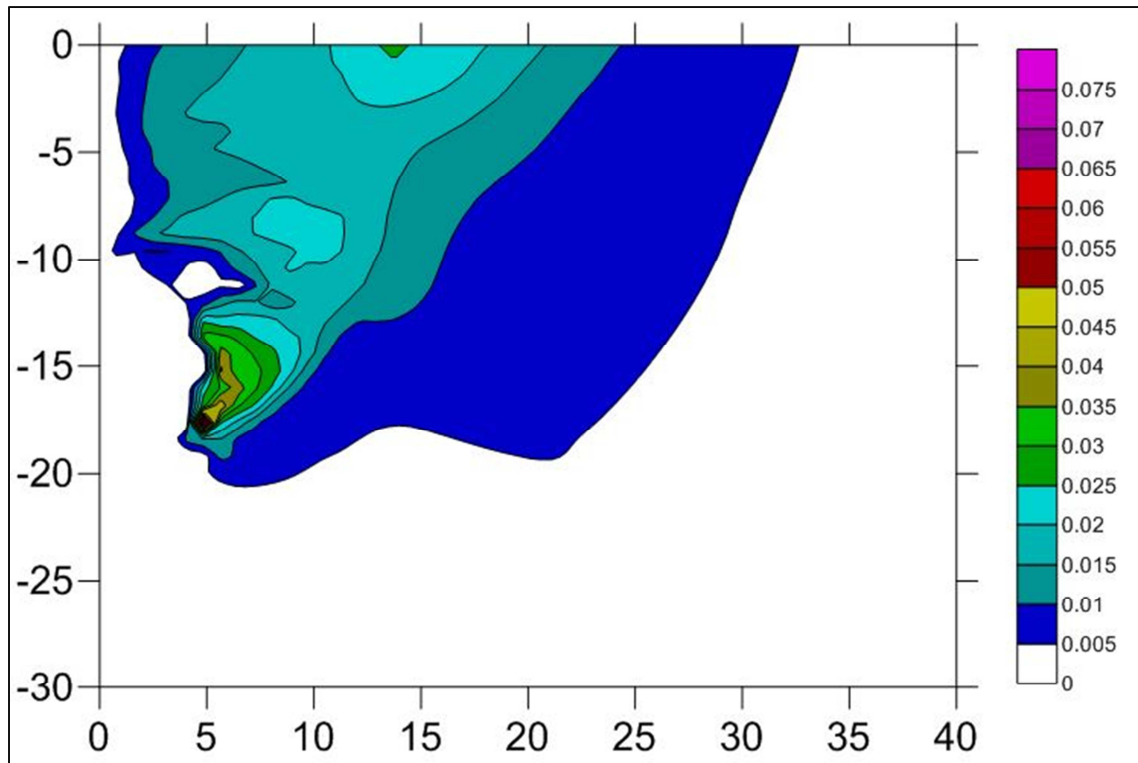


Ilustración 5. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro K_o (1.3%) - CC

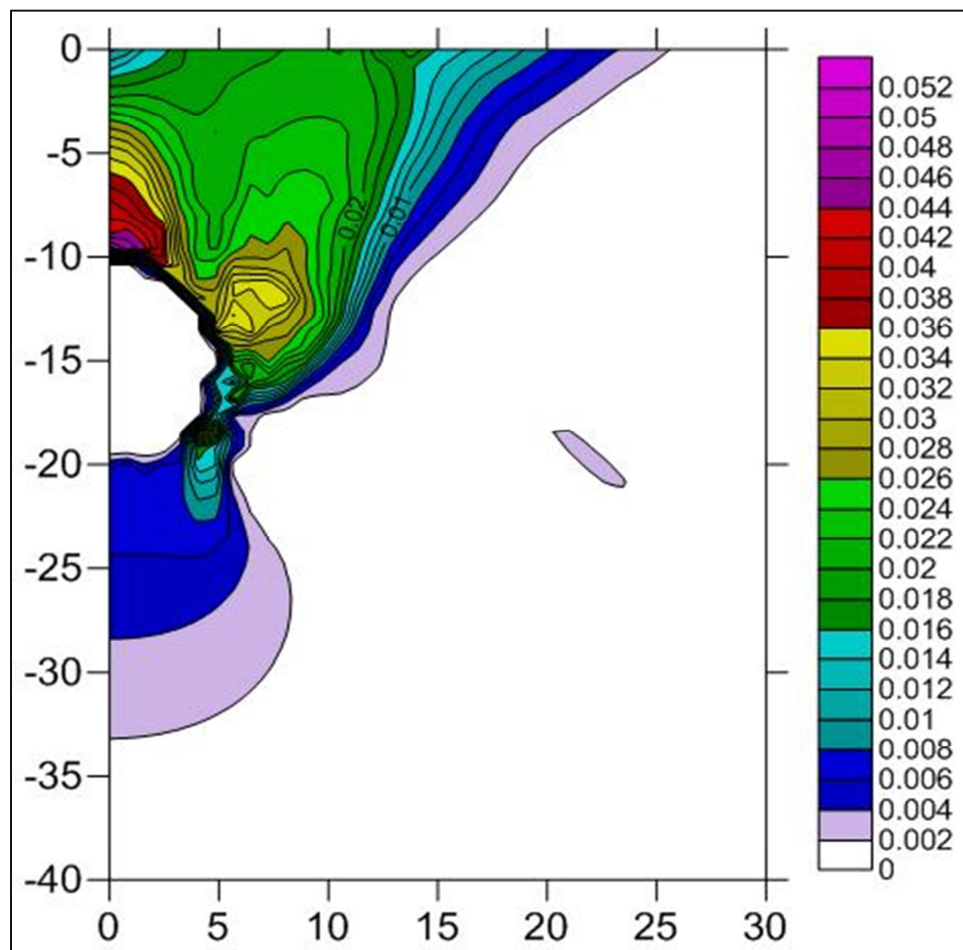


Ilustración 6. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro K_o (1.3%) - CC

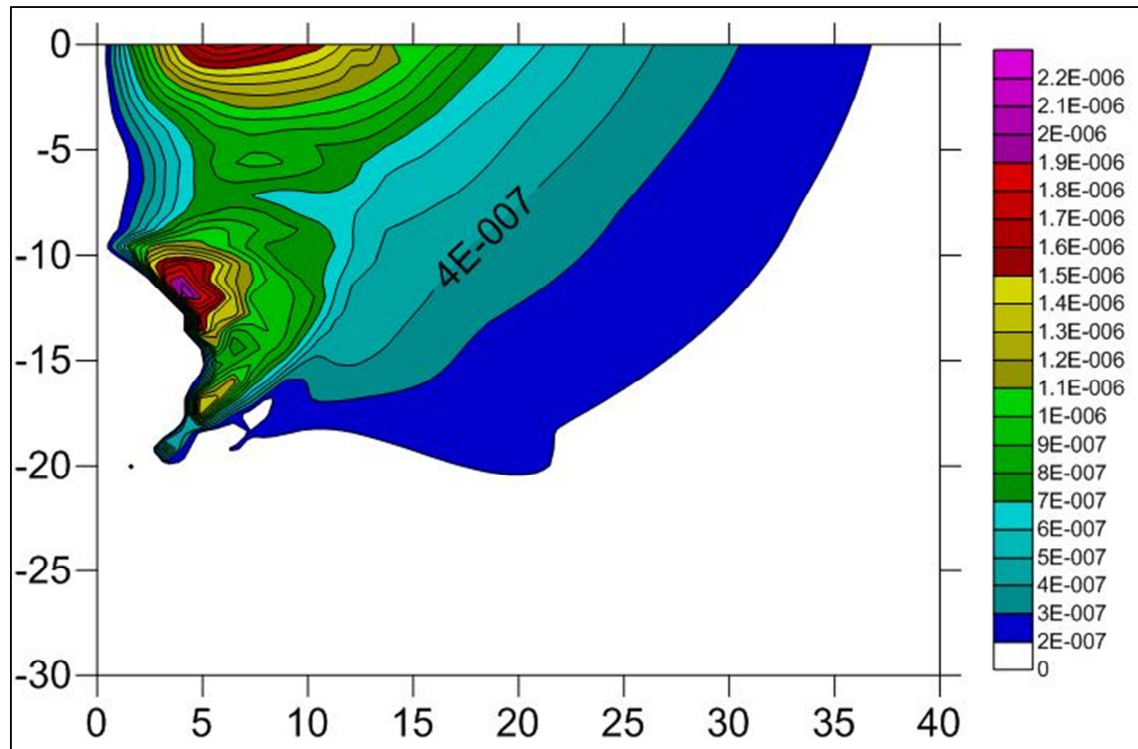


Ilustración 7. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro E50 (1.3%) - CC

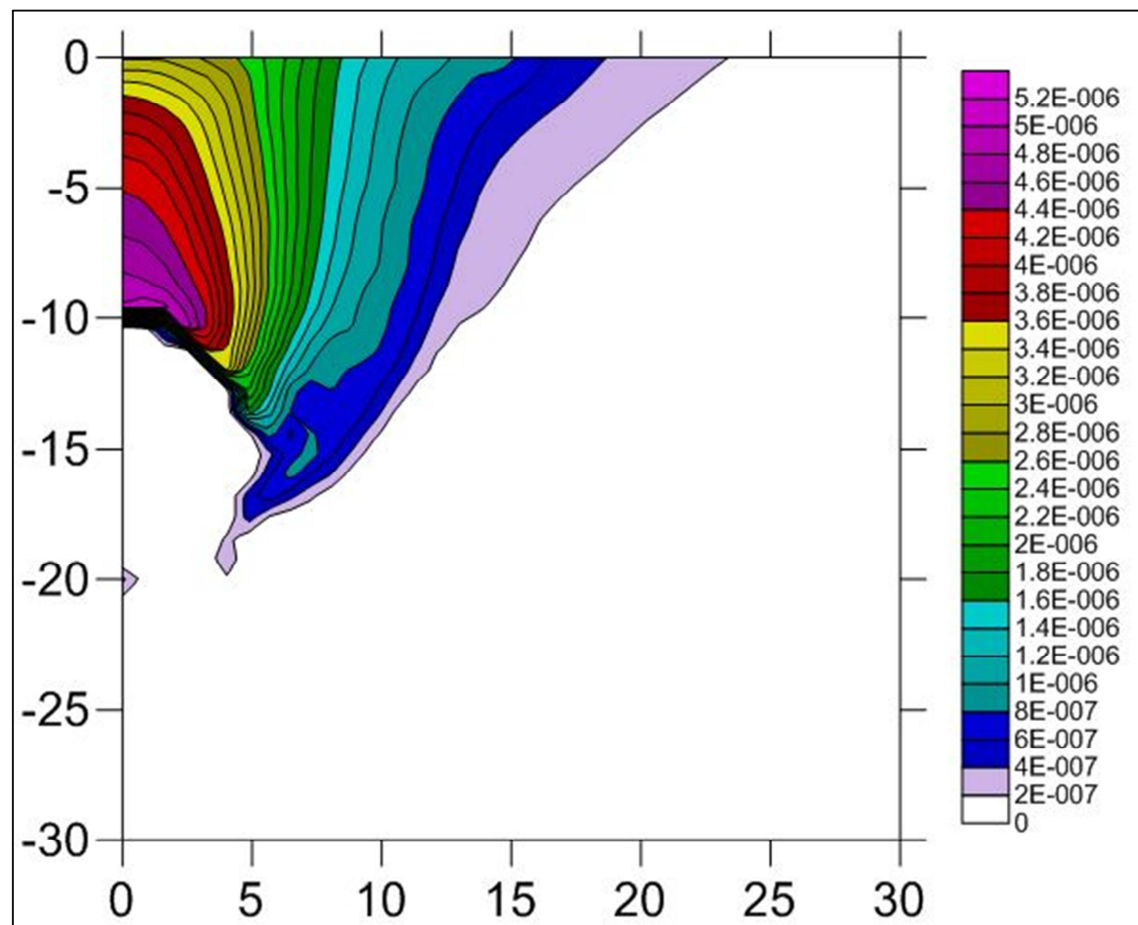


Ilustración 8. Sensibilidad de los movimientos vertical (Y) respecto al parámetro E50 (1.3%) - CC

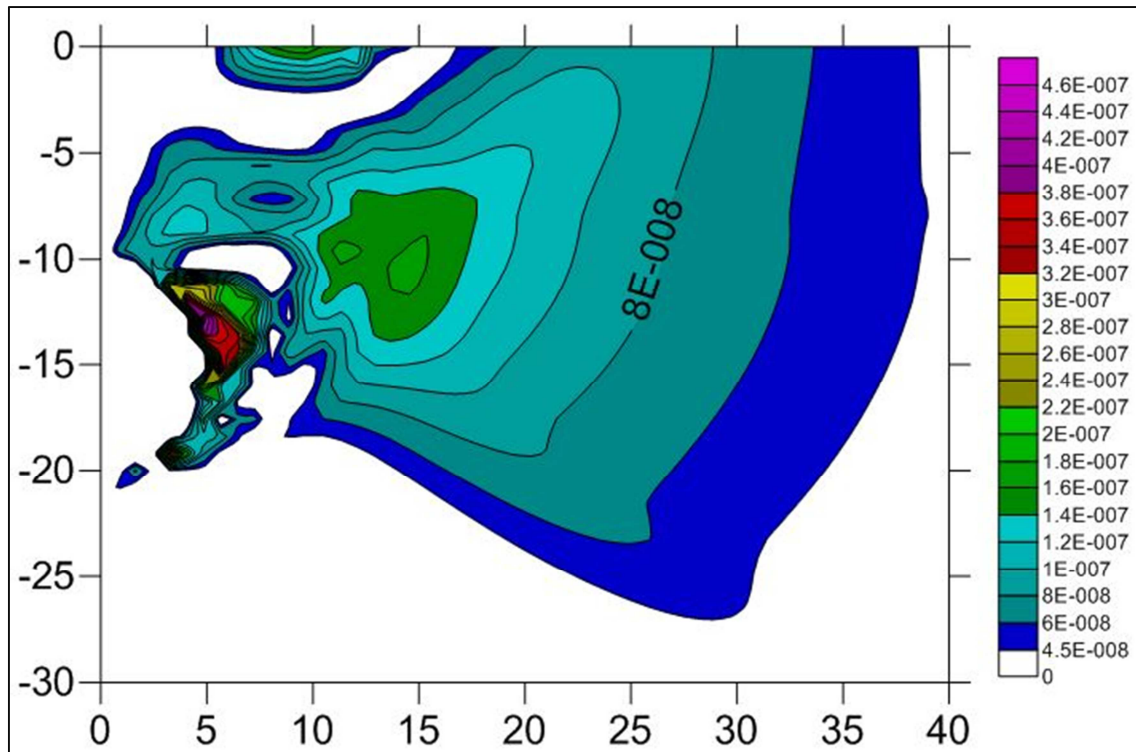


Ilustración 9. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Eur (1.3%) - CC

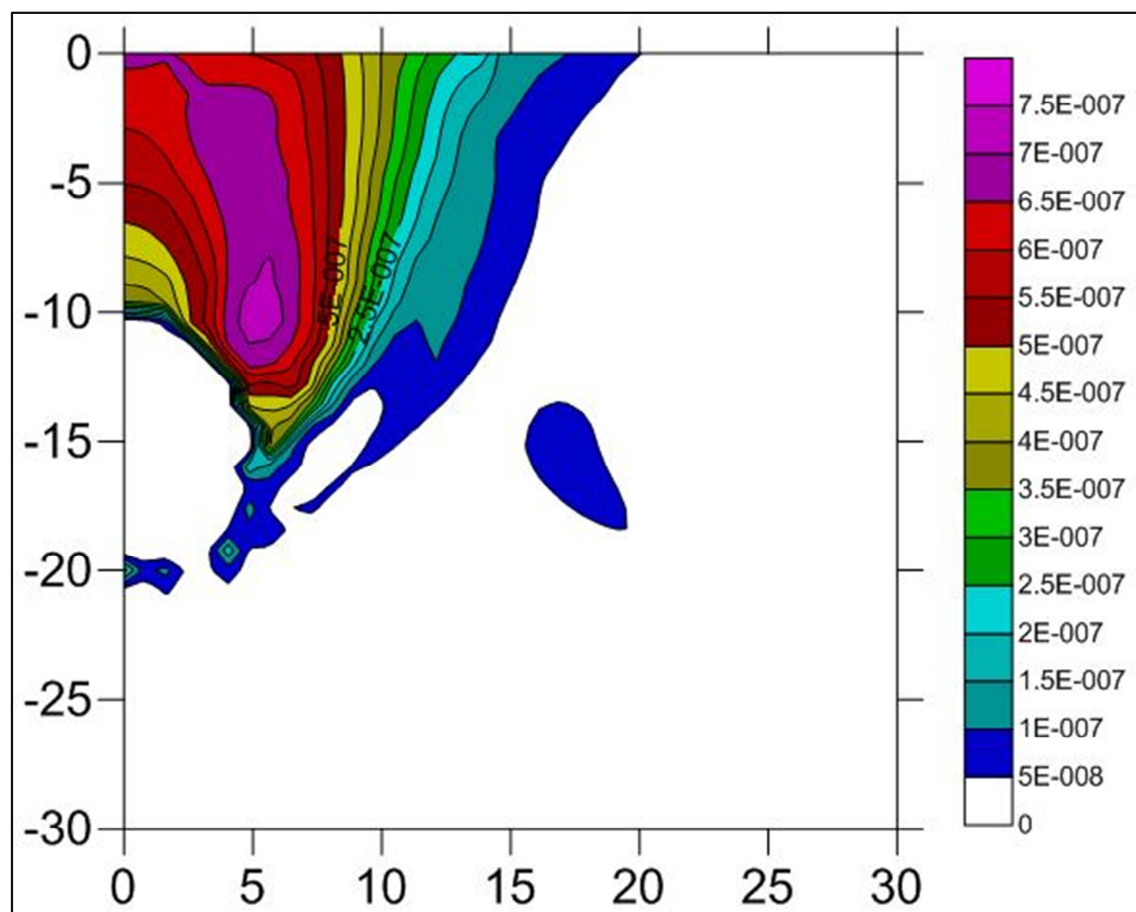


Ilustración 10. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Eur (1.3%) - CC

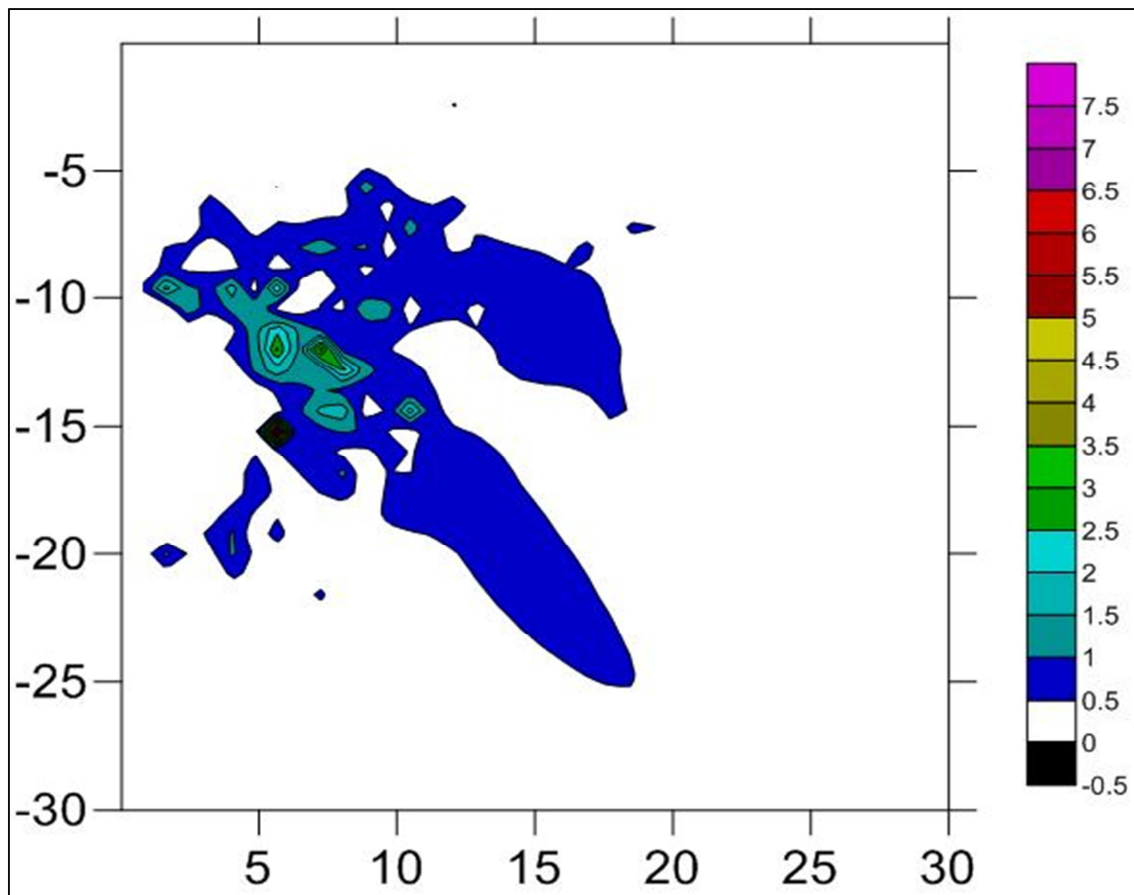


Ilustración 11. Sensibilidad de la presión de agua respecto del parámetro Cohesión (1.3%) - CC

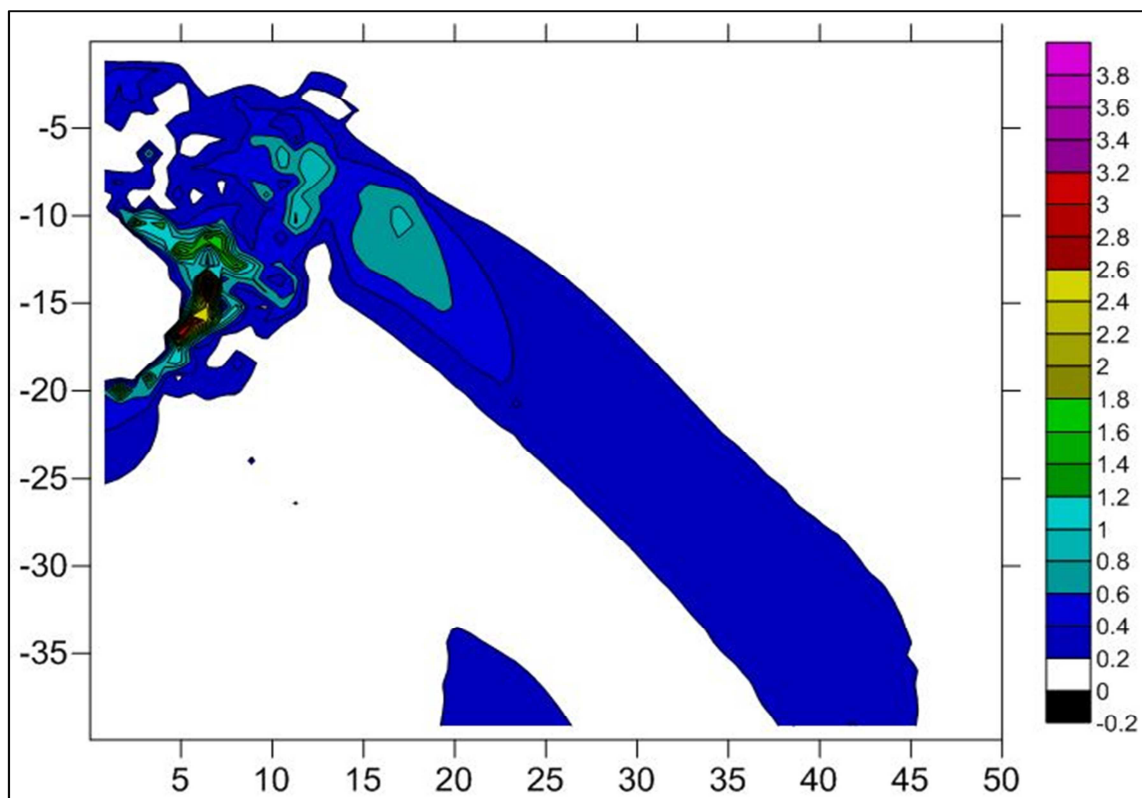


Ilustración 12. Sensibilidad de la presión de agua respecto del parámetro Phi (1.3%) - CC

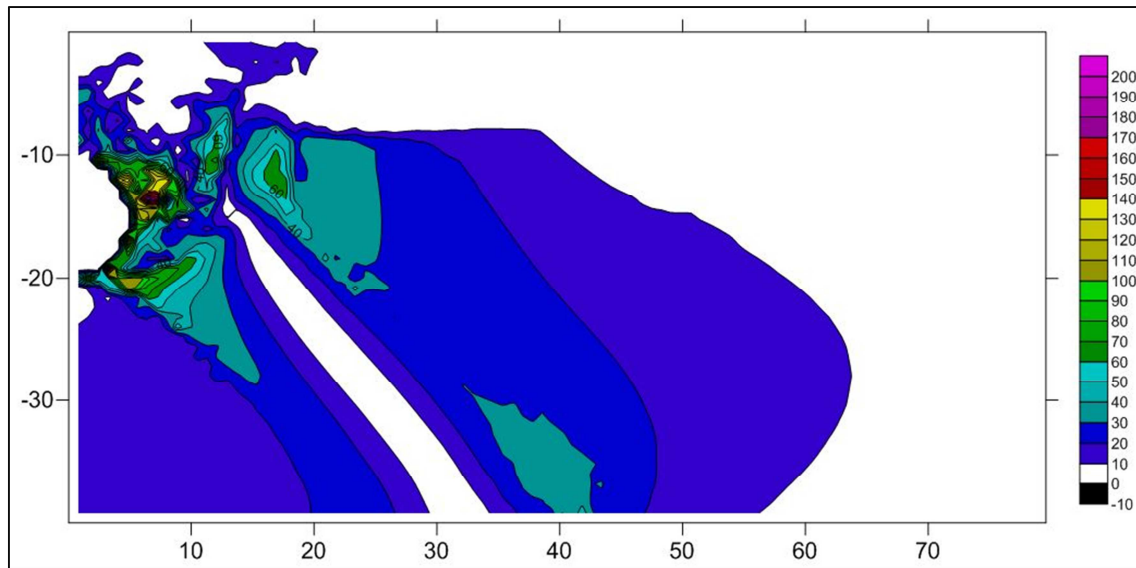


Ilustración 13. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro K_o (1.3%) - CC

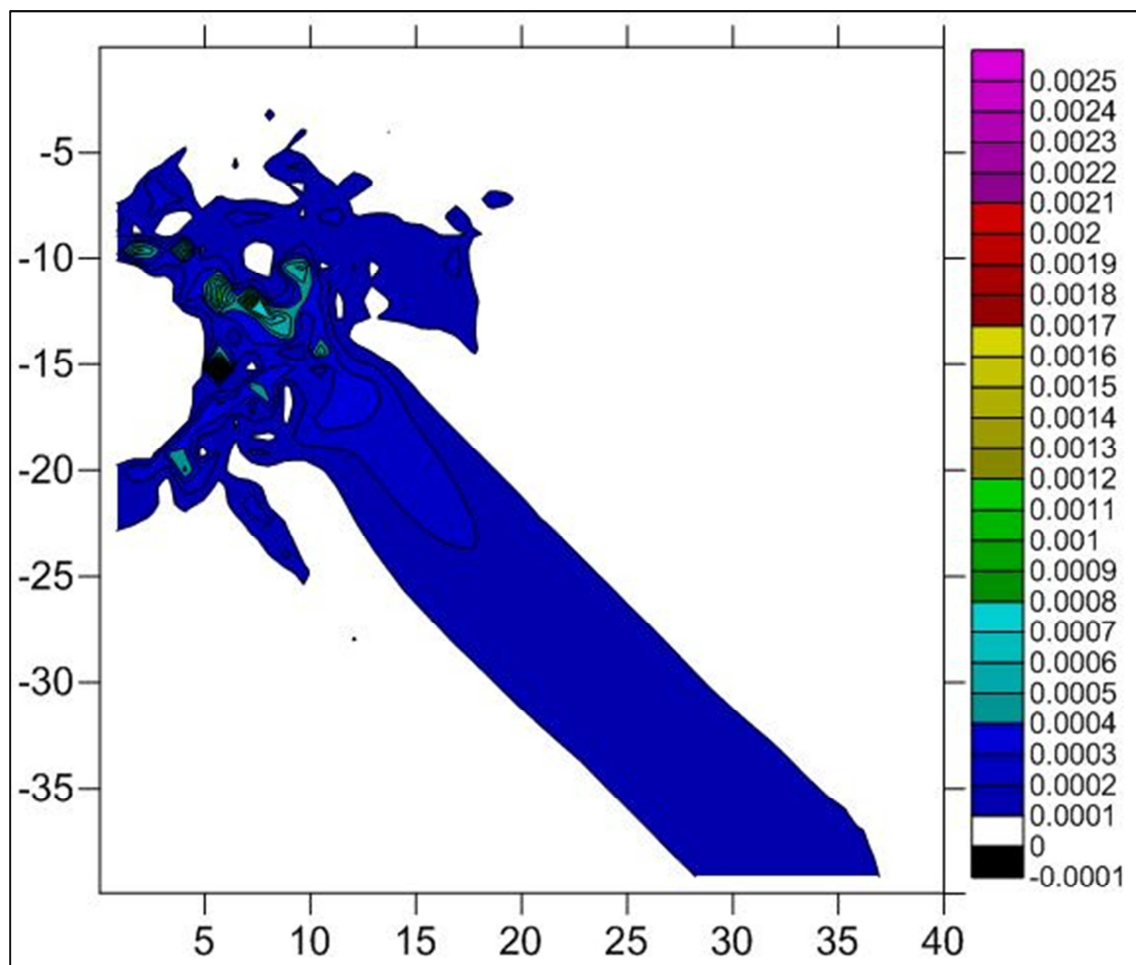


Ilustración 14. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro E_{50} (1.3%) - CC

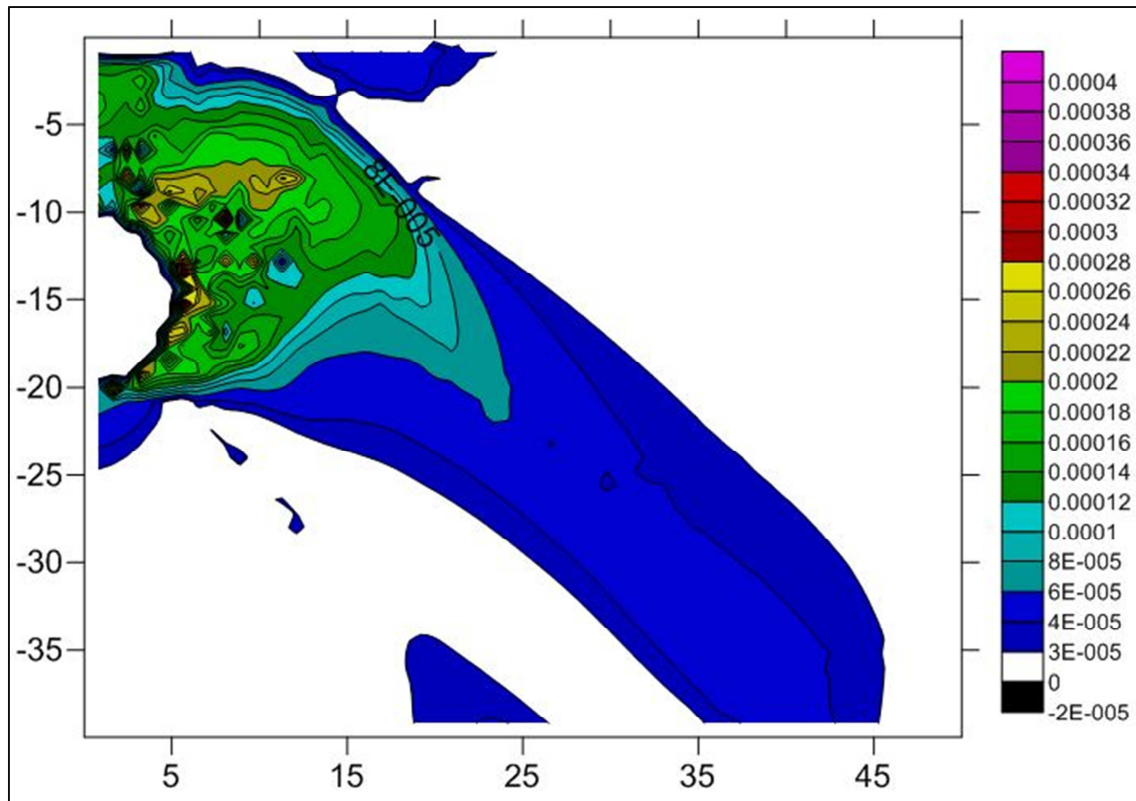


Ilustración 15. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Eur (1.3%) - CC

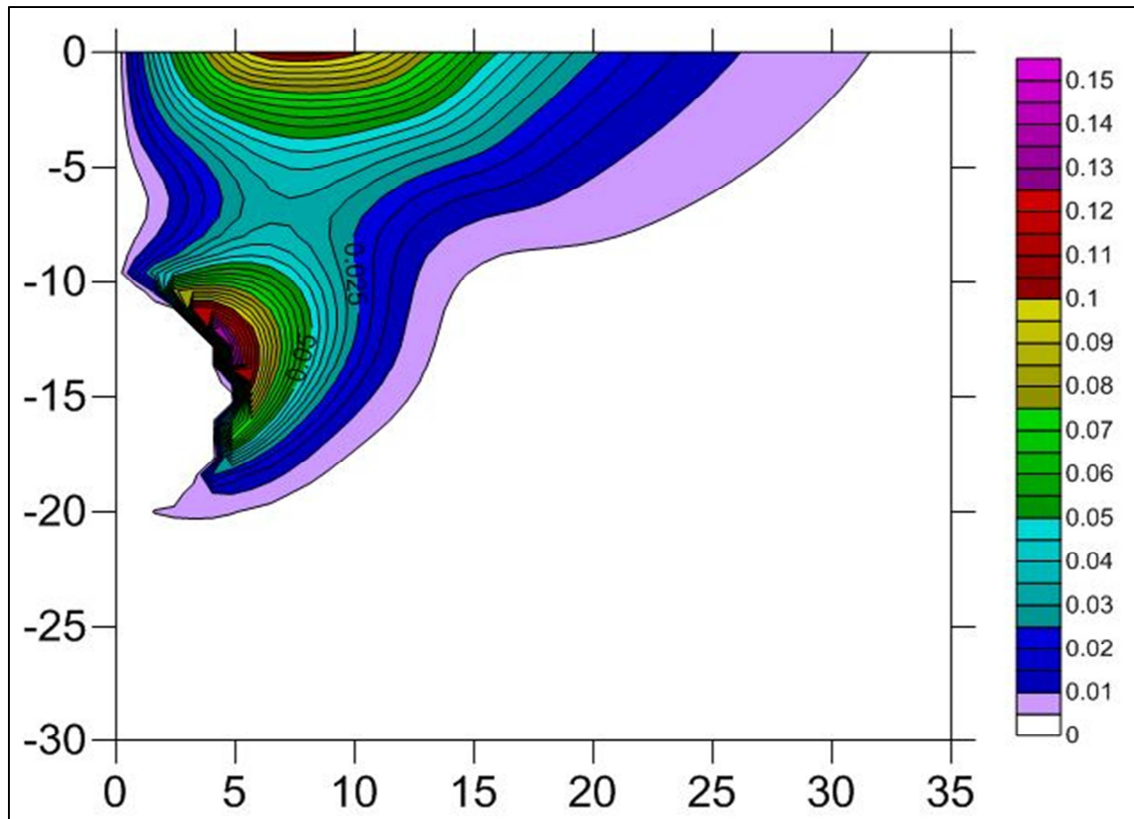


Ilustración 16. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) - LC

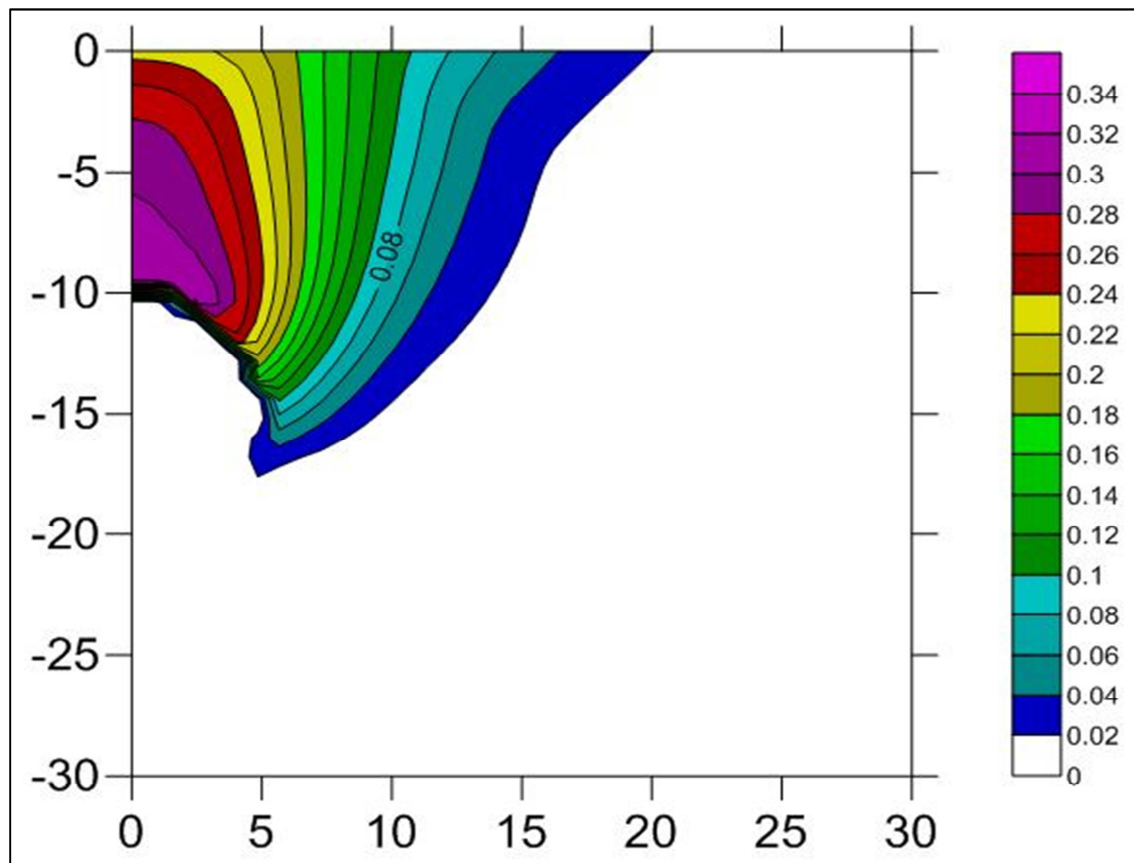


Ilustración 17. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Cohesión (1.3%) - LC

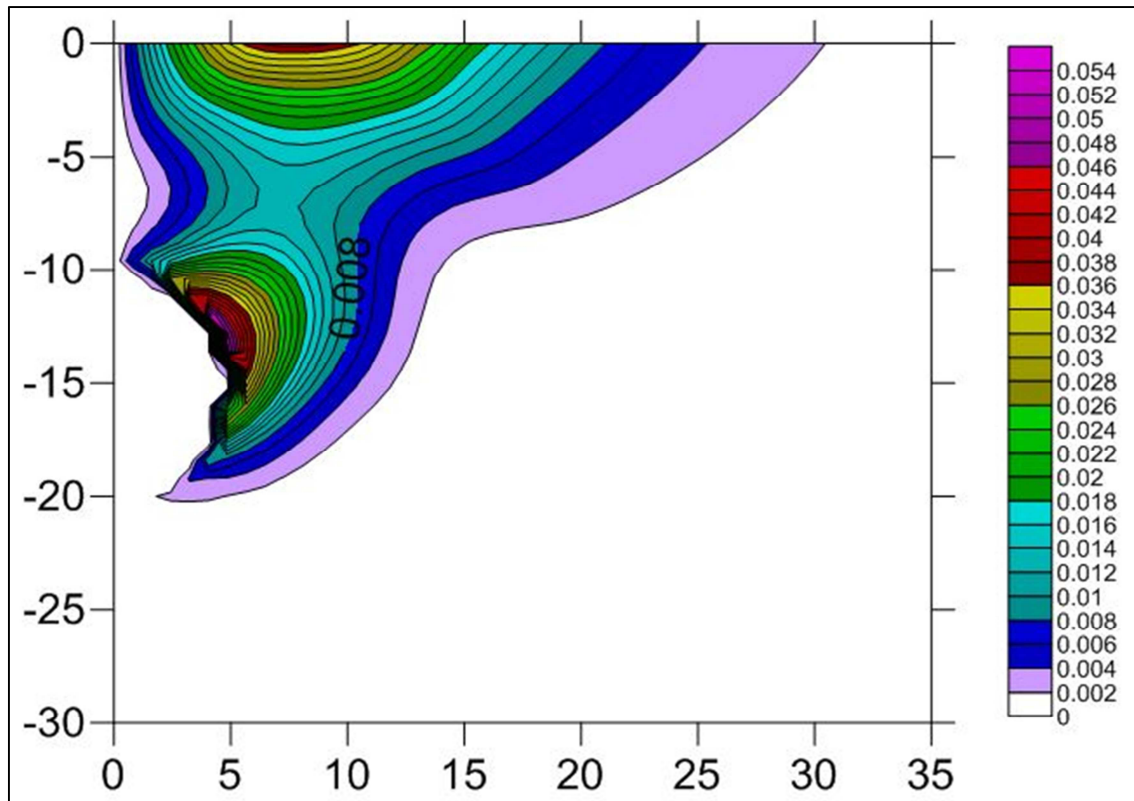


Ilustración 18. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Φ (1.3%) - LC

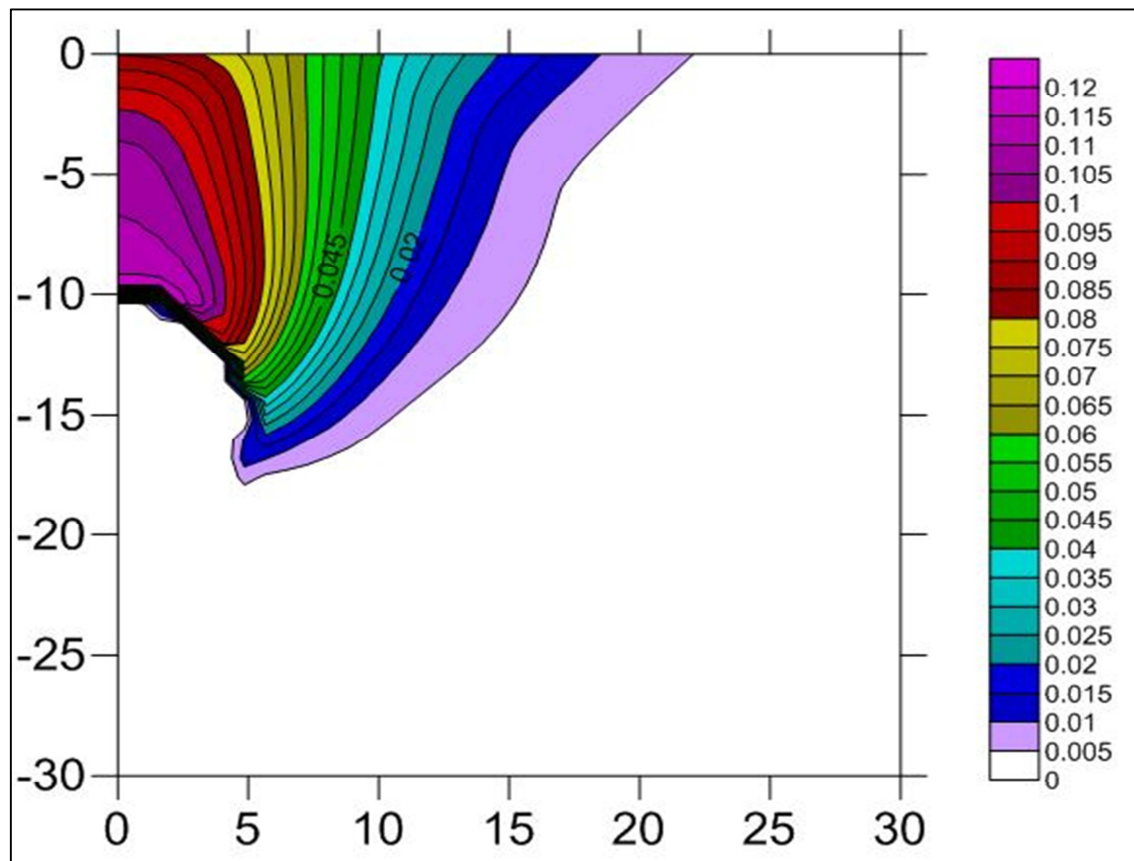


Ilustración 19. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Φ (1.3%) - LC

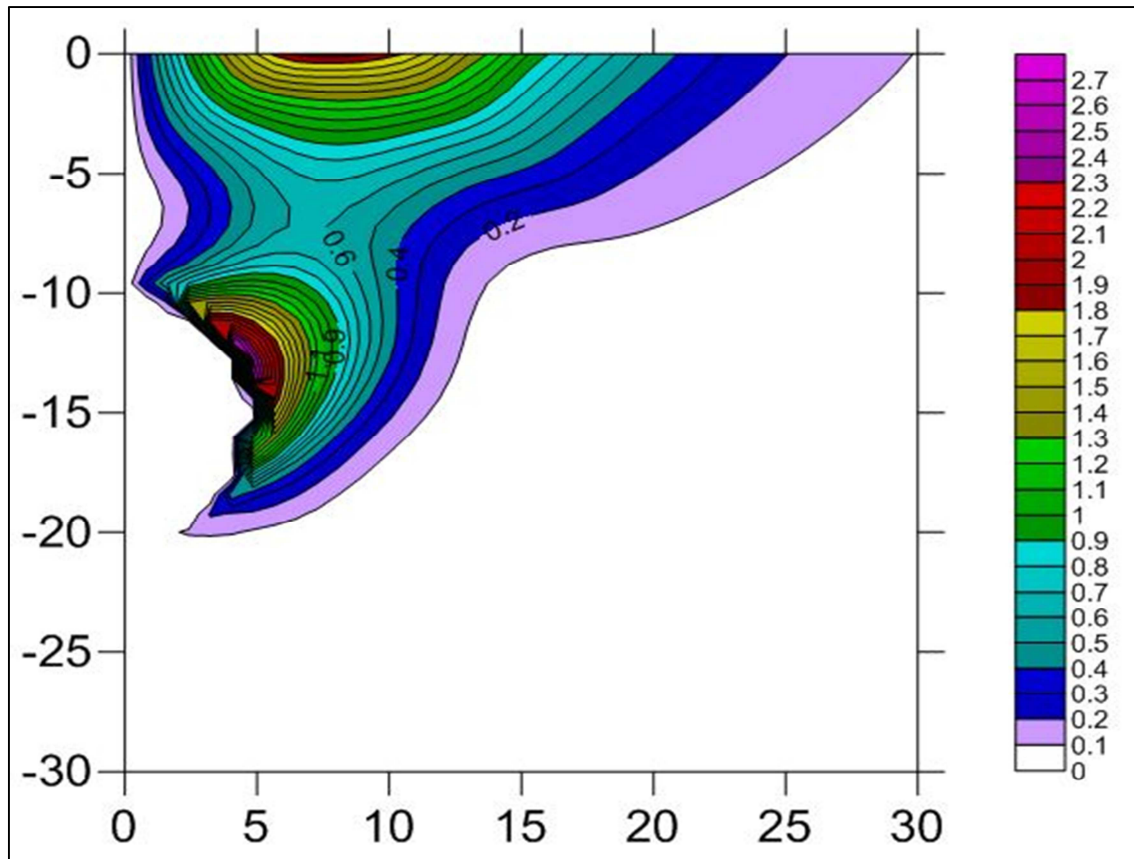


Ilustración 20. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro K_o (1.3%) - LC

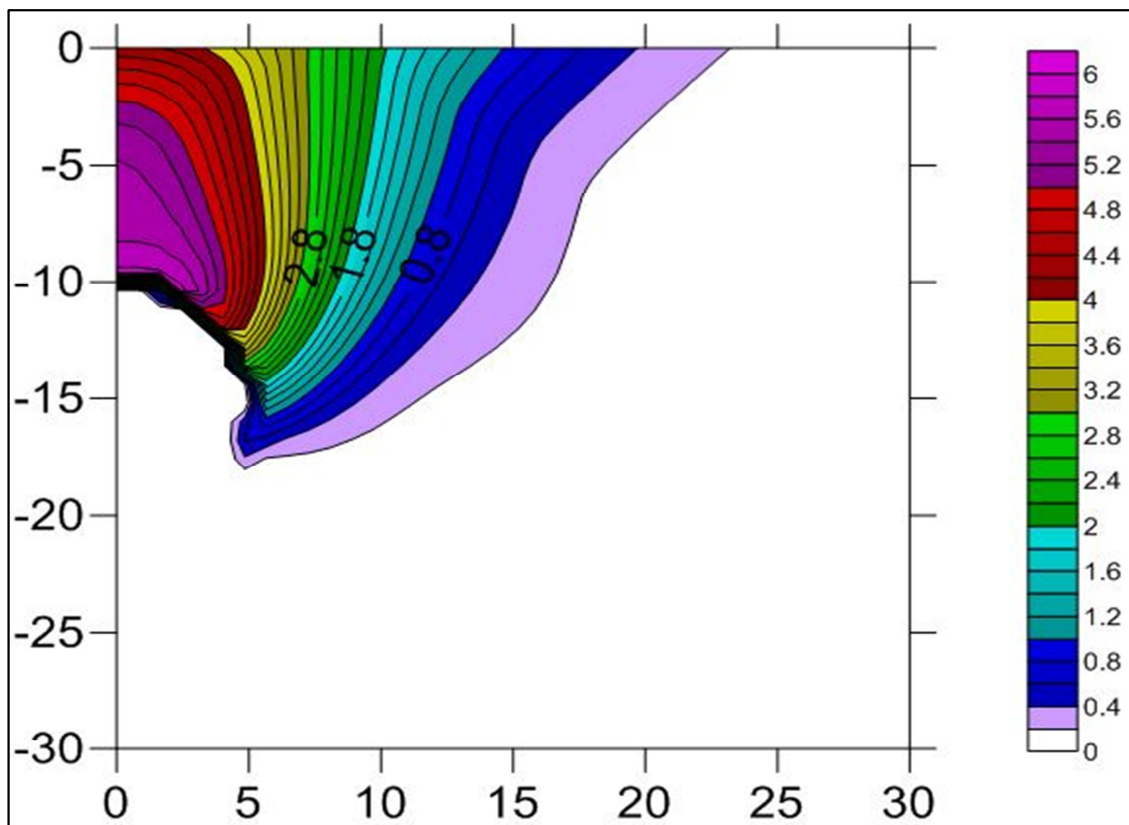


Ilustración 21. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro K_o (1.3%) - LC

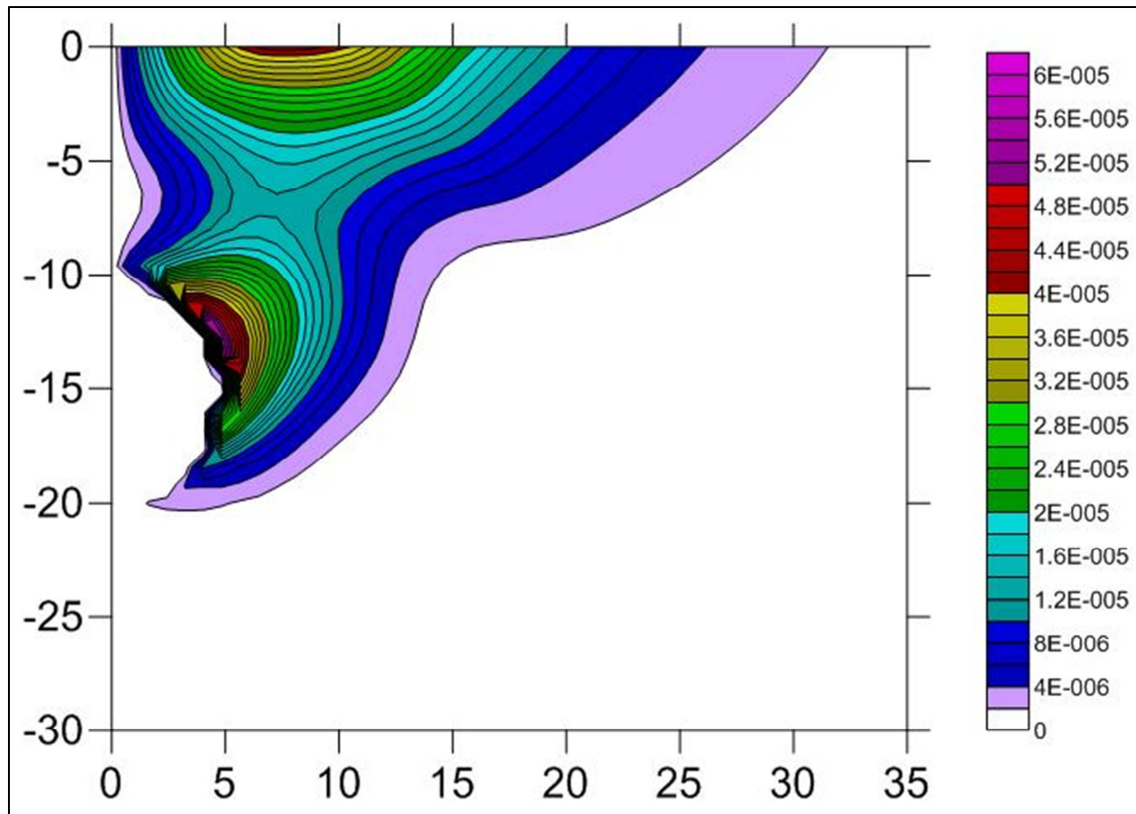


Ilustración 22. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro E50 (1.3%) - LC

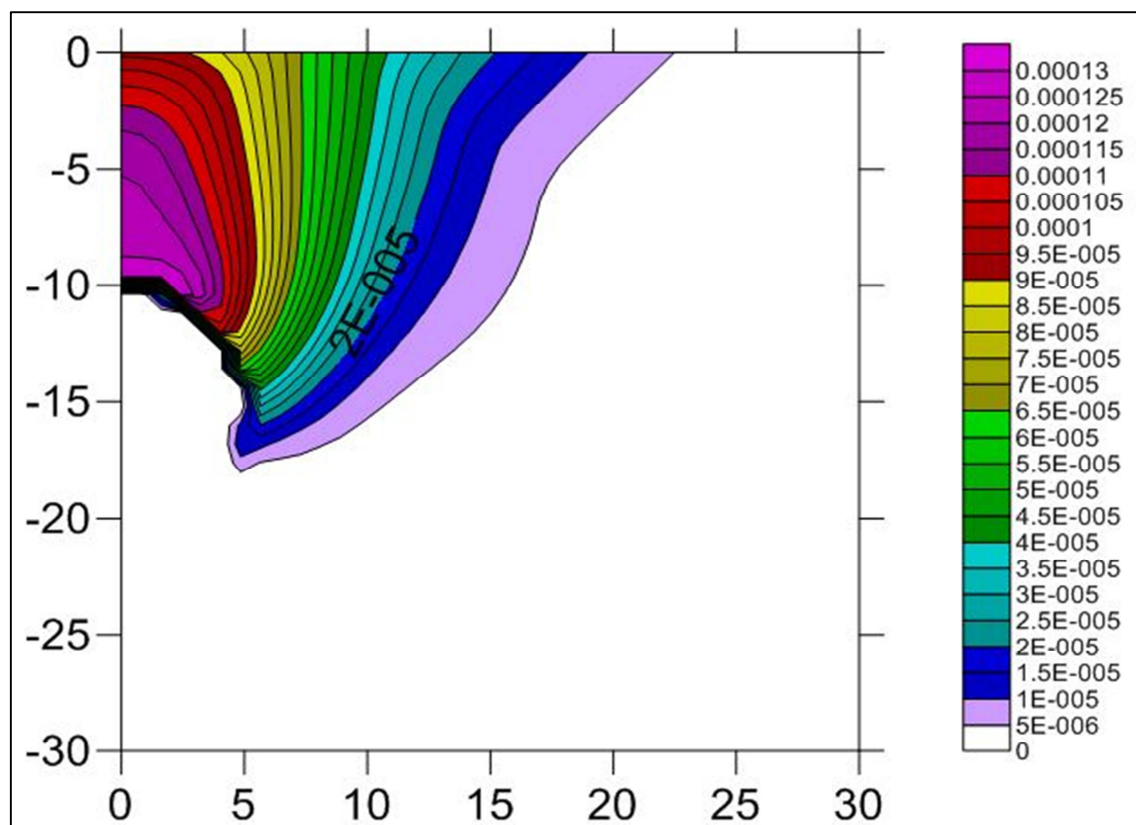


Ilustración 23. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro E50 (1.3%) - LC

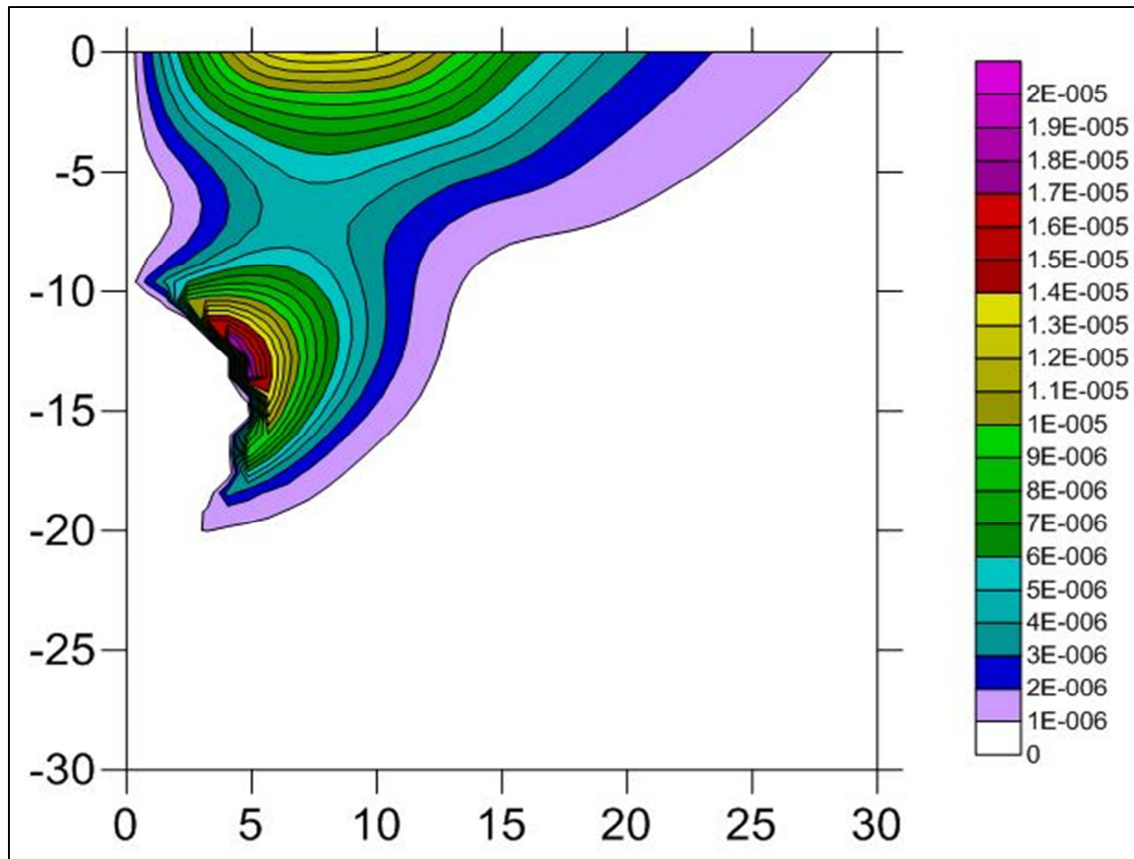


Ilustración 24. Sensibilidad de los movimientos horizontales (X) respecto al parámetro Eur (1.3%) - LC

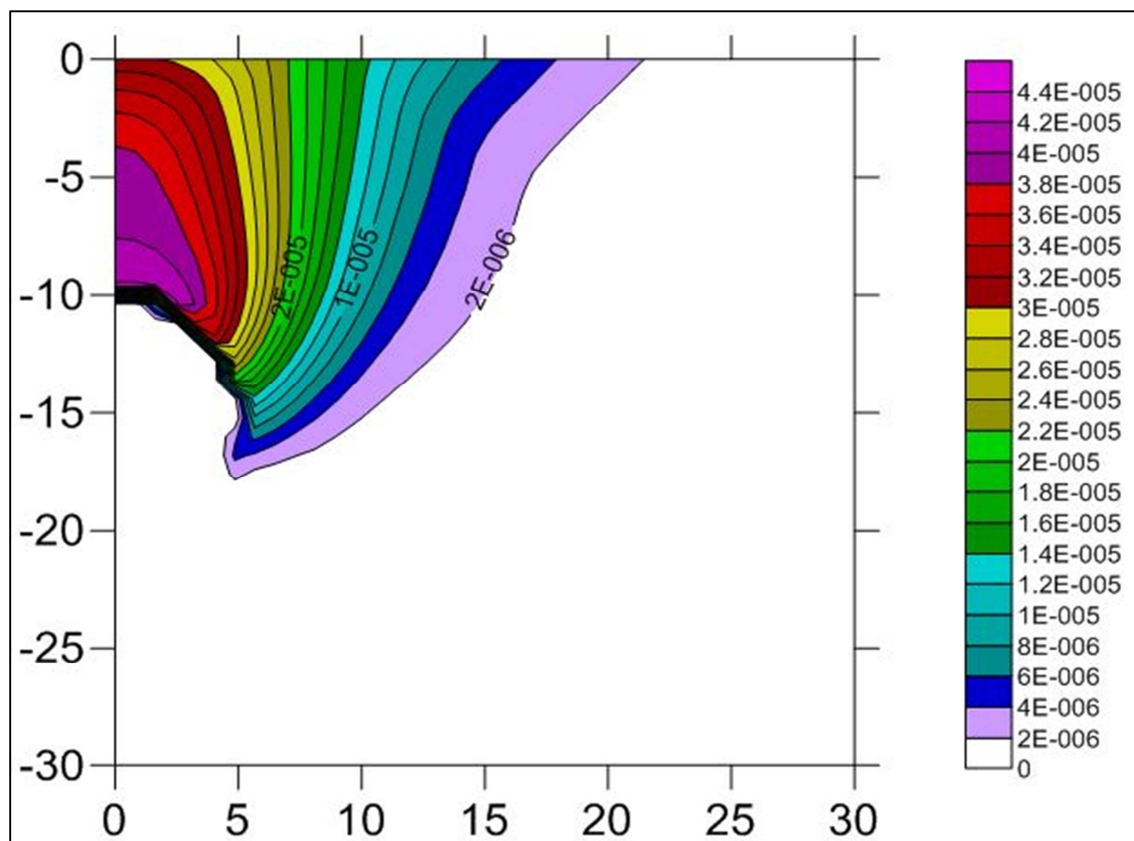


Ilustración 25. Sensibilidad de los movimientos verticales (Y) respecto al parámetro Eur (1.3%) - LC

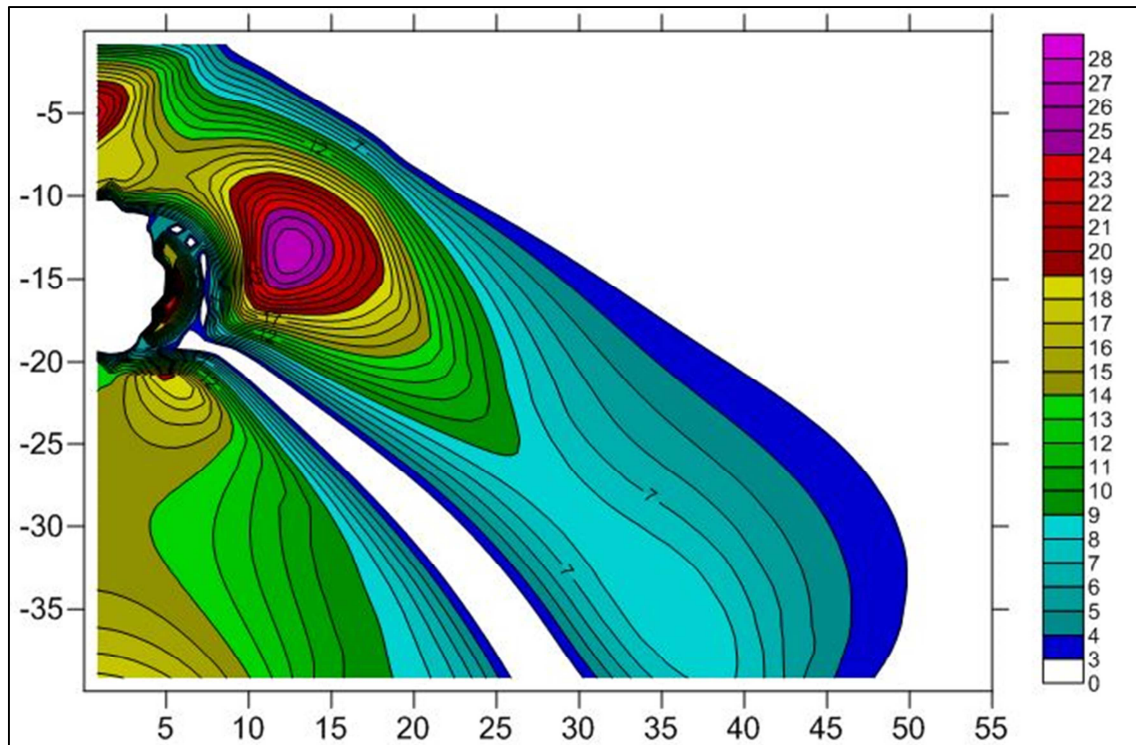


Ilustración 26. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Cohesión (1.3%) - LC

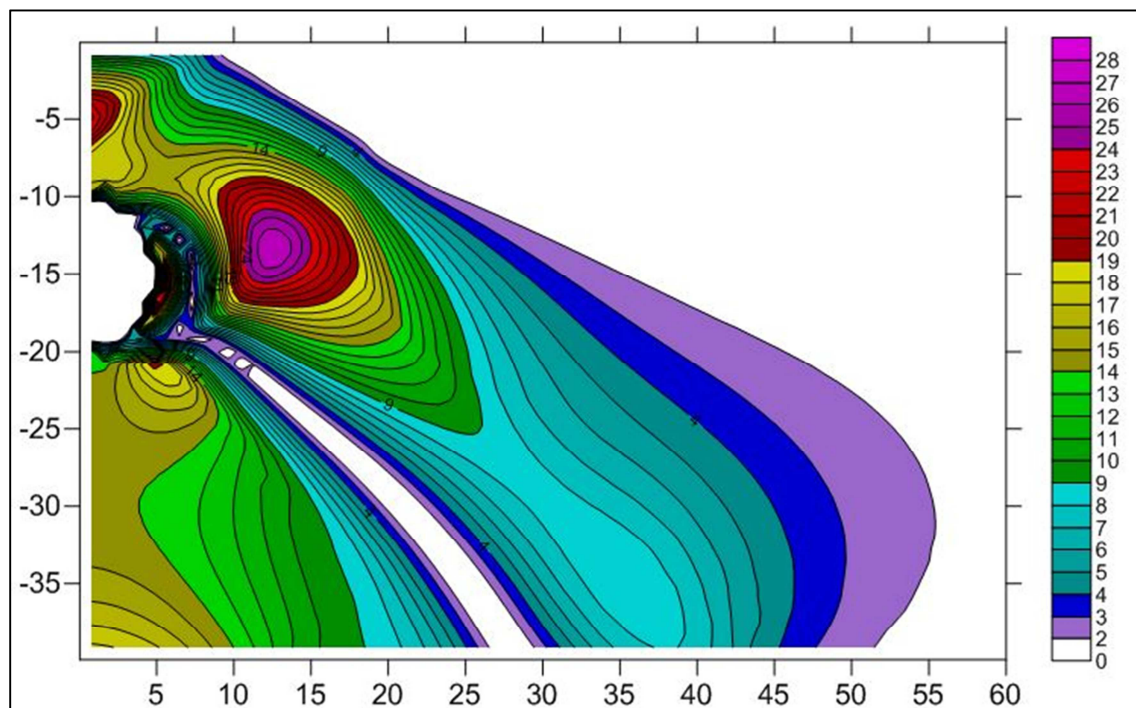


Ilustración 27. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Phi (1.3%) - LC

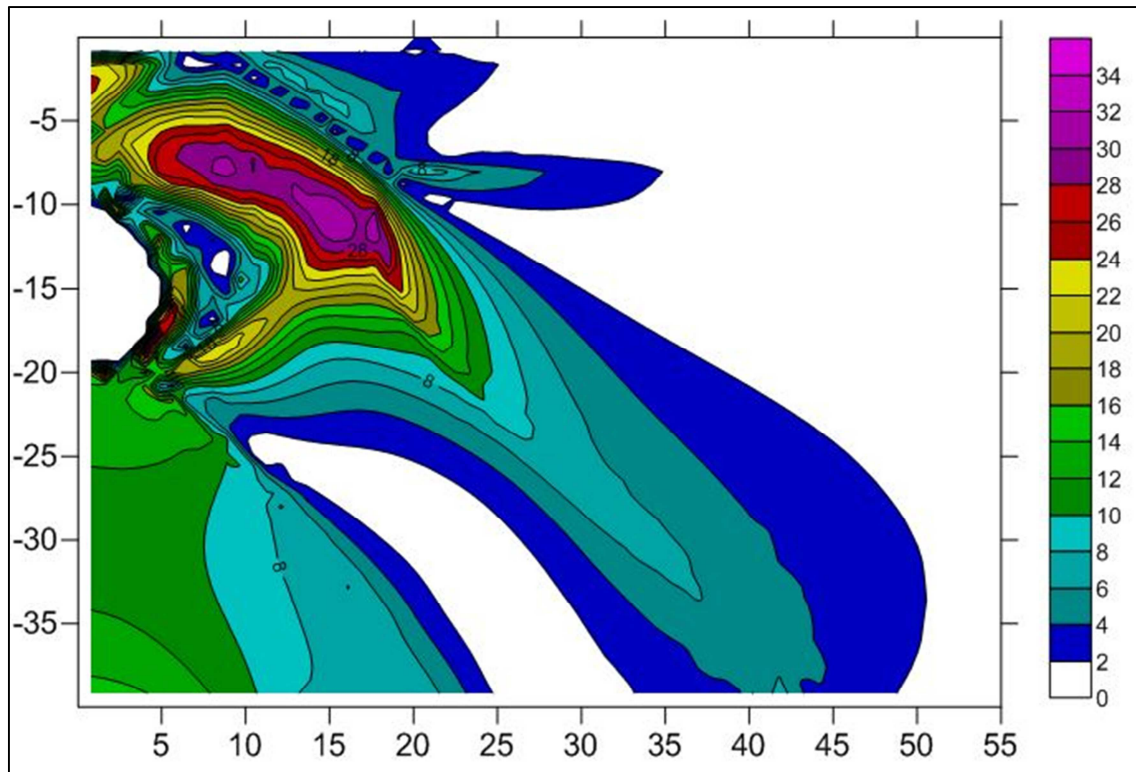


Ilustración 28. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro K_o (1.3%) - LC

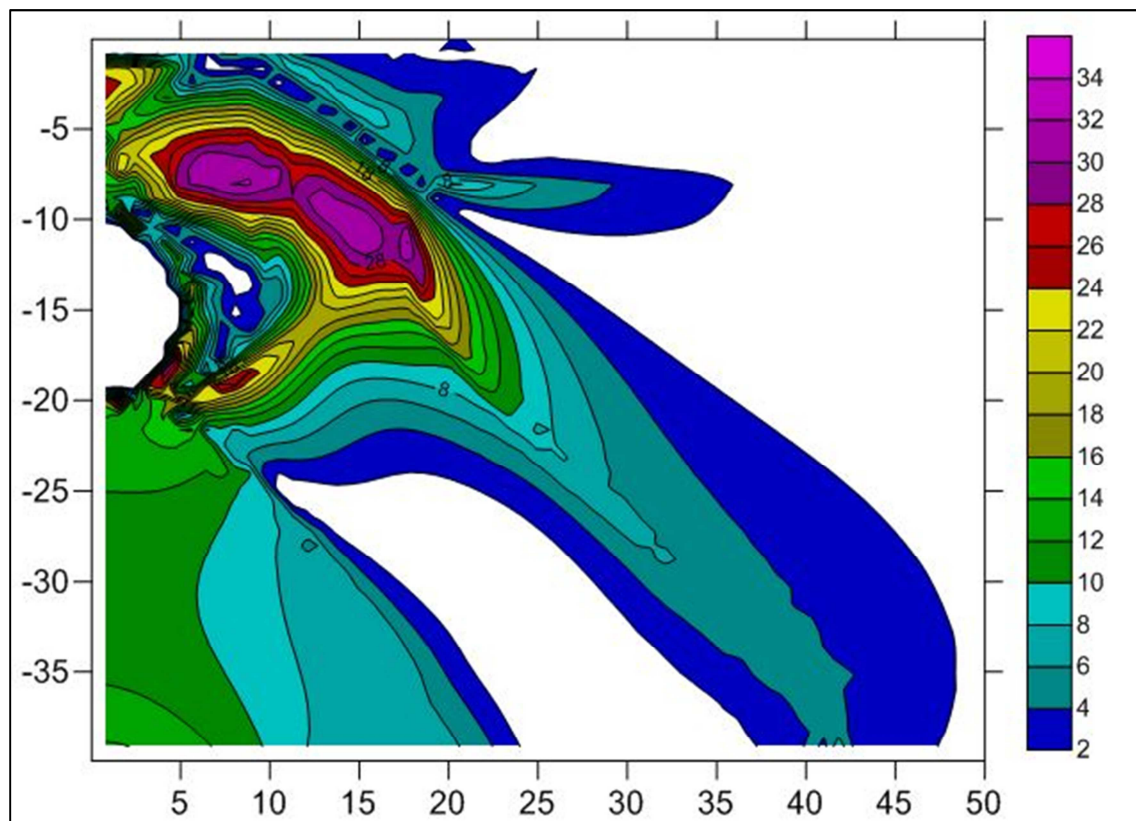


Ilustración 29. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro E_{50} (1.3%) - LC

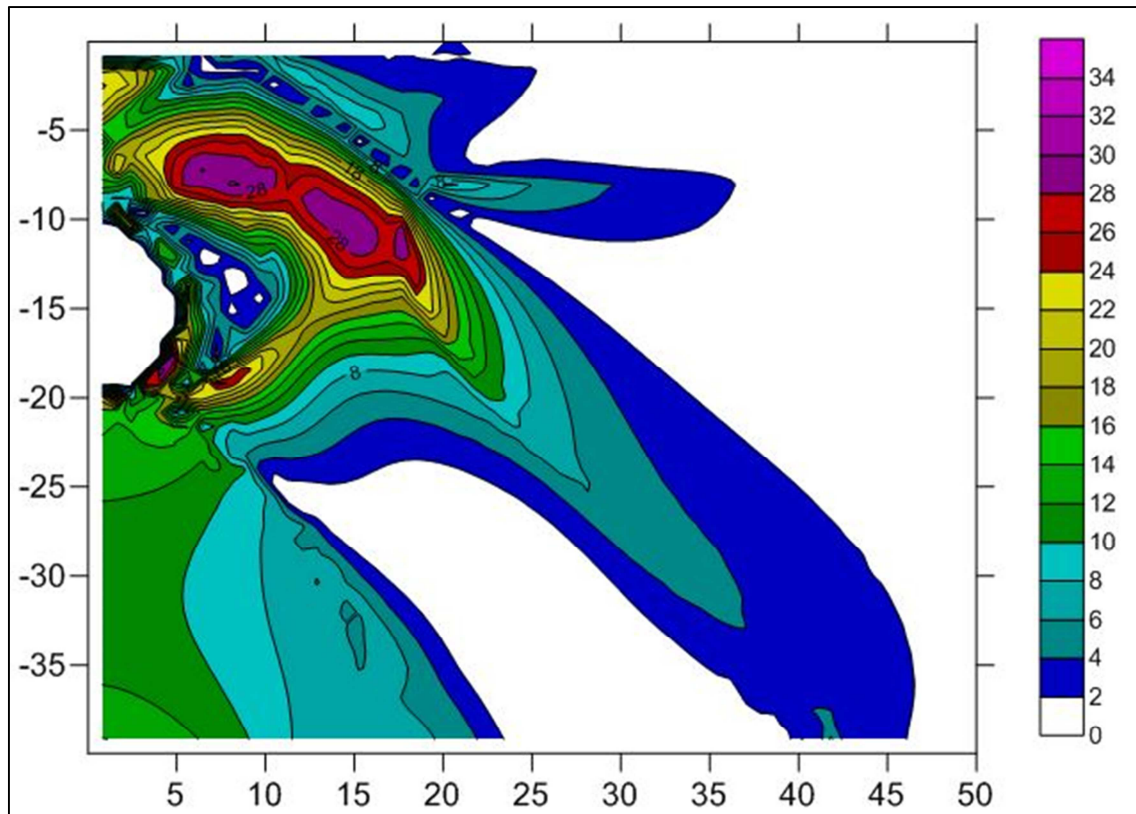


Ilustración 30. Sensibilidad de la presión de agua respecto al parámetro Eur (1.3%) - LC